



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**MODERNIZACE PODVOZKOVÉHO MODULU
POJÍZDNÉHO SKLADOVÉHO SYSTÉMU**

MODERNIZATION OF THE UNDERCARRIAGE MODULE OF THE MOBILE STORAGE SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Markéta Pastrnková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Studentka:	Markéta Pastrnková
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Modernizace podvozkového modulu pojízdného skladového systému

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Konstrukční návrh úprav základního modulu pojízdného regálového systému pro jednotkovou nosnost do 30000 kg. Současně používaná svařovaná konstrukce rámu bude nahrazena technologicky jednodušším řešením s využitím válcovaných profilů. Návrh musí zohledňovat technologické možnosti firmy SSI-Schäfer s.r.o. Základní technické parametry:

rychlost pojezdu 4 m/min,
průměr kola 180 mm.

Cíle bakalářské práce:

Koncepční návrh úprav.

Pevnostní výpočet nově navržených úprav včetně ověření pomocí MKP.

Celková sestava.

Podsestava rámu podvozku.

Seznam doporučené literatury:

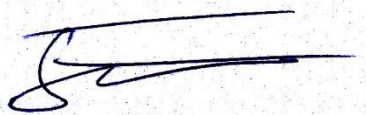
BIGOŠ, Peter, Jozef KULKA, Melichar KOPAS a Martin MANTIČ. Teória a stavba zdvihačích a dopravných zariadení. Vyd. 1. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2012. Edícia vedeckej a odbornej literatúry (Technická univerzita v Košiciach). ISBN 978-80-553-1187-6.

SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

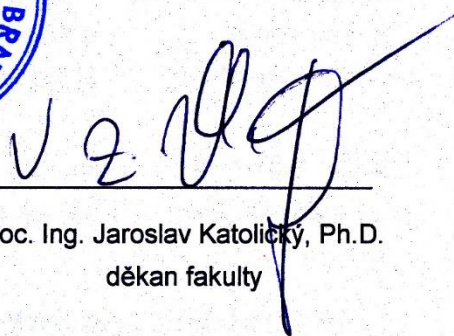
ČSN EN 15512: 2009. Ocelové statické skladovací systémy - Přestavitelné paletové regálové systémy
- Zásady navrhování konstrukce.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 26. 10. 2018



prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V bakalářské práci jsou prezentovány výsledky úprav podvozkového modulu pojízdného regálového systému označovaného VRS. Koncepční návrh podvozkového modulu byl vytvořen v CAD software Inventor a pevnostní kontrola konstrukčního řešení byla provedena v konečně prvkovém programu R-FEM od společnosti Dlubal Software s.r.o, a taktéž byla provedena verifikační studie v programu ANSYS Workbench R19 Mechanical od společnosti ANSYS, Inc. Nový model byl vypracován podle platných norem ČSN EN 15620 a byly zohledňovány zejména technologické možnosti firmy SSI-Schäfer s.r.o. Navrhované řešení má sloužit především k zefektivnění procesu výroby a poskytnout vyšší únosnost. Stávající řešení je srovnáno s nově vytvořeným řešením.

KLÍČOVÁ SLOVA

podvozkový modul, program R-FEM, ANSYS, mobilní regálový systém

ABSTRACT

The bachelor's thesis presents the results of the modification of the undercarriage module of the mobile storage system called VRS. The conceptual design of the undercarriage module was created in Inventor CAD software and strength test of structural design was performed in the finite element analysis software R-FEM by Dlubal Software s.r.o company, and also has been done verification study in ANSYS Workbench R19 Mechanical program by ANSYS, Inc company. The new model was developed in accordance with valid ČSN EN 15620 standards and especially the technological possibilities of SSI-Schäfer s.r.o. were taken into account. The proposed solution is intended primarily to make the production process more efficient and to provide higher carrying capacity. The existing solution is compared with the newly created solution.

KEYWORDS

undercarriage module, program R-FEM, ANSYS, mobile rack system

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PASTRNKOVÁ, Markéta. *Modernizace podvozkového modulu pojízdného skladového systému* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116913>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Miroslav Škopán.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že je tato práce mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením svého školitele doc. Ing. Miroslava Škopána, Csc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Markéta Pastrnková

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat panu doc. Ing. Miroslavu Škopánovi, CSc. a kolektivu firmy SSI-Schäfer s.r.o. za rady a připomínky, které mi pomohly k vypracování bakalářské práce. Děkuji také své rodině za podporu v průběhu celého studia.

OBSAH

Úvod	10
1 Logistika skladování	11
2 Paletové regály	13
2.1 Statické regály	13
2.2 Spádové regály	13
2.3 Pojezdové (podvozkové) regály	14
2.4 Shrnutí	15
3 Současný stav řešeného podvozkového modulu	16
3.1 Pojízdný regál	16
3.2 Podvozkové pole	17
3.3 Podvozek	18
3.3.1 Popis konstrukce	18
3.3.2 Technologický postup výroby podvozku	19
4 Návrh vlastního řešení	22
4.1 Konstrukční řešení	22
4.2 Technologický postup výroby	23
4.3 Zhodnocení výroby podvozků	24
5 Numerické modelování	25
5.1 Obecné informace a práce v programu RFEM	25
5.2 Stanovení vnějších zatížení	25
5.3 Okrajové podmínky	28
5.4 Síť konečných prvků	30
5.5 Zadaná vnější zatížení	31
5.6 Parametry výpočtu – typ řešiče	32
5.7 Výsledky z programu RFEM	33
5.7.1 Podporové reakce – původní model 24 tun	33
5.7.2 Podporové reakce – nový model 24 tun	34
5.7.3 Podporové reakce – nový model 30 tun	35
5.7.4 Deformace – původní model 24 tun – Charakteristické zatížení	36
5.7.5 Deformace – nový model 24 tun – Charakteristické zatížení	37
5.7.6 Deformace – nový model 30 tun – Charakteristické zatížení	38
5.7.7 Napětí von mises – původní model 24 tun – Návrhové zatížení pro lineární materiálový model	39
5.7.8 Napětí von mises – Nový model 24 tun – Návrhové zatížení pro lineární materiálový model	39

5.7.9	Napětí von mises – Nový model 30 tun – Návrhové zatížení pro lineární materiálový model	40
5.7.10	Poměrné přetvoření – původní model 24 tun – Návrhové zatížení pro bilineární materiálový model	40
5.7.11	Poměrné přetvoření – Nový model 24 tun – Návrhové zatížení pro bilineární materiálový model	41
5.7.12	Poměrné přetvoření – Nový model 30 tun – Návrhové zatížení	41
5.7.13	Vyhodnocení	42
5.8	Verifikační numerický model navrhovaného řešení pojízdného regálu v systému ANSYS	43
5.8.1	Okrajové podmínky	43
5.8.2	Sít' konečných prvků	43
5.8.3	Zadaná vnější zatížení	44
5.8.4	Parametry výpočtu	45
5.8.5	Výsledky	45
5.8.6	Porovnání řešení RFEM vs. ANSYS	47
	Závěr	48
	Seznam použitých zkratk a symbolů	51
	Seznam příloh	52

ÚVOD

Skladování materiálu je důležitou složkou logistického řetězce každého podniku či firmy. V dnešní době je konkurence mezi firmami zajišťující skladovací logistiku velká, proto si i zákazníci se specifickými individuálními požadavky mohou vybírat na trhu z mnoha firem, které jsou schopny tyto požadavky splnit. Důležitým aspektem skladování materiálu je využitelnost skladovacího prostoru. S tímto hlediskem úzce souvisí také nosnost jednotlivých regálů. Řešené posuvné regály nabízejí maximalizaci skladovacího prostoru.

Cílem této bakalářské práce je vytvoření koncepčního návrhu základního podvozkového modulu pojízdného regálového systému pro jednotkové zatížení do 30000 kg včetně pevnostního ověření nově navržených úprav pomocí software založeného na metodě konečných prvků. Koncepční návrh podvozkového modulu byl vytvořen v CAD programu Inventor a pevnostní kontrola konstrukčního řešení byla ověřena v konečně prvkových programech RFEM od společnosti Dlubal Software s.r.o. a ANSYS Workbench R19 Mechanical od společnosti ANSYS, Inc. Oba uvedené programy slouží pro pevnostní analýzu konstrukcí. Tato práce je rozdělena do několika částí.

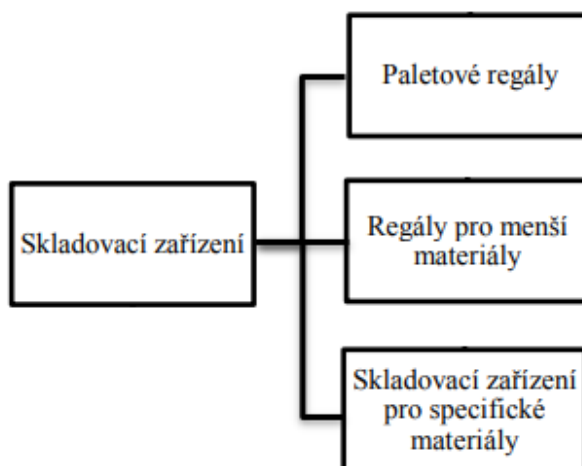
V kapitole 2 je uvedena stručná rešerše možností skladování zboží na paletových regálech, jenž jsou v současnosti dostupné na trhu. V kapitole 3 je představena současná podoba řešení podvozkového modulu, která je následně konfrontována v kapitole 4 s novou koncepcí podvozkového modulu s popisem technologického postupu výroby. V kapitole 5 jsou prezentovány výsledky pevnostní analýzy. Pro numerické modelování byly vybrány dva konečně prvkové programy. Pro prvotní návrh a ověření stávající a nové konstrukce podvozkového modulu byl vybrán program RFEM, v kterém jsou kombinovány prutové a skořepinové elementy. Finální numerický model nové koncepce podvozkového modulu byl vytvořen v software ANSYS.

1 LOGISTIKA SKLADOVÁNÍ

Během posledního století došlo k obrovskému ekonomickému rozvoji, který se projevil jak vznikem podniků, jejich růstem a rozšířením na rozličné trhy, tak také podporou obchodní strategie. Tento proces vyvolal větší potřebu koordinace pohybu veškerého zboží, které vedly k hlubším úvahám, jak toto zboží skladovat. Logistika skladování se tedy zabývá zdokonalením a optimalizací skladů a to tak, aby pro firmu představovaly co nejmenší náklady a zároveň bylo dosaženo vyšších zisků. [1], [2]

V dnešní době se stala logistika obrovským trendem uznávaným po celém světě. V mnoha podnicích dochází ke snižování objemu zboží na nezbytně nutné minimum nebo dokonce k úplnému zrušení skladů a zavedení výroby přímo podle aktuální poptávky. Tato metoda se nazývá *Just in time (JIT)* – tedy že dodávka materiálu a součástek se uskuteční až v okamžiku, kdy je jich ve výrobě zapotřebí. Tuto metodu však nelze aplikovat ve všech podnicích. Proto v těchto podnicích dochází k optimalizaci ve skladování zboží a materiálů, čemuž významně napomáhá exponenciální růst technologických možností. [3], [4]

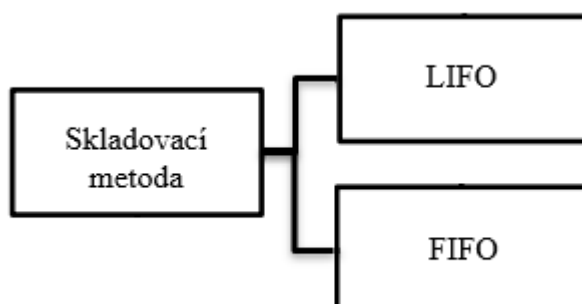
Sklady lze rozlišovat dle mnoha kritérií. Jedním z možných hledisek je např. dle druhu uskladněného materiálu.



Obr. 1 Rozdělení dle druhu uskladněného materiálu

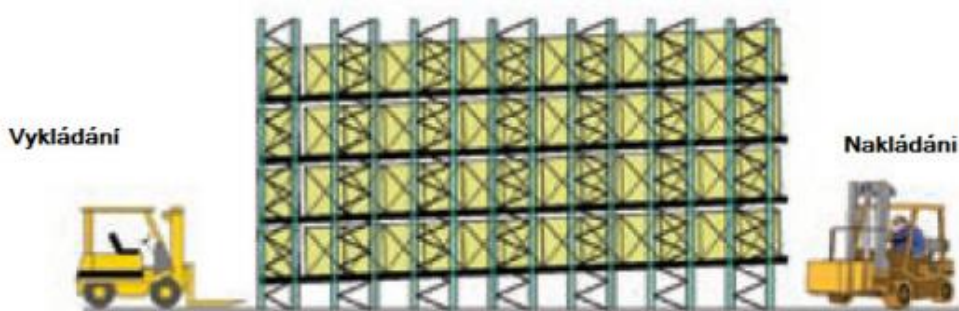
Paletové regály umožňují uskladnění rozmanitého typu materiálu, který je uložen do palet o stejných nebo podobných rozměrech. Podrobněji jsou tyto regály popsány v kapitole 2. Regály pro menší materiály slouží zejména k uskladnění nejrozličnějších součástek, které se používají pro kompletaci větších komponent. Tento materiál bývá uskladněn buď v krabicích, přepravkách nebo přímo v regálech. U skladovacího zařízení pro menší materiály v zásadě rozlišujeme dvě možné varianty přístupu. První je nazýváno *člověk ke zboží (man to goods)*, kdy si člověk musí sám pro tento materiál dojit. Druhé *zboží k člověku (goods to man)*, kdy se zboží samo dopraví na místo vykládky. Skladovací zařízení pro specifické materiály jsou určeny k uskladnění materiálu, jenž nelze uskladnit na paletách či přepravkách. Patří zde například dlouhé materiály, u kterých se využívá ke skladování konzolových regálů. Nebo může jít o skladování sudů, pneumatik, cívek apod. [2], [3], [5]

Dalším možným kritériem rozdělení skladů je také to, v jakém pořadí budou materiály naskladněny a vyskladněny.



Obr. 2 Rozdělení skladovacích metod dle pořadí naskladnění a vyskladnění materiálu

Varianta FIFO (first-in/first-out) má místo nakládky naproti vykládce. První vložená paleta se stane první odebranou (obr. 3). Možnost LIFO (last-in/first-out) má totožné místo naskladnění s vyskladněním. Paleta uložená jako poslední, bude z regálu brána první (Obr. 4). [6], [7], [8]



Obr. 3 Skladovací systém s válečkovými tratěmi FIFO [9]



Obr. 4 Skladovací systém s válečkovými tratěmi LIFO [9]

2 PALETOVÉ REGÁLY

Jednotlivé materiály se od sebe mohou lišit svými rozměry a tvarem, proto upřednostňujeme ukládání těchto komponent do krabic nebo palet shodných rozměrů. Paletové regály jsou převážně určeny ke skladování zboží na europaletách. Europalety jsou normované manipulační jednotky o rozměrech 1200x800x144 mm. Jsou čtyřstěnné, tzn., že s nimi lze manipulovat vysokozdvížným vozíkem ze všech čtyř stran. [5], [10]

Základním prvkem všech skladovacích zařízení jsou regály. Podle velikosti, hmotnosti a obratu (toku) uskladněného materiálu se volí vhodný typ konstrukce a výška regálu. Regálové konstrukce se skládají ze skladových buněk, do kterých se umísťují palety. [1]

2.1 STATICKÉ REGÁLY

K nejobvyklejším regálům patří příhradové regály, které se skládají z jednoduché ocelové konstrukce s rámy a nosníky. Jsou určeny pro skladování různých typů palet (kovové, plastové, dřevěné). Mezi pozitiva tohoto skladovacího systému patří dobrá a okamžitá dostupnost ke všem uskladněným paletám. S tím úzce souvisí i možnost případné změny v koncepci skladování. Materiál je uskladněn přehledně a práce s ním je proto rychlejší. Další výhodou je poměrně nízká pořizovací cena a rychlá instalace regálů. K nevýhodám tohoto systému patří bezpochyby nevyužitelnost skladovací plochy zapříčiněná uličkami, které se nachází mezi každým blokem regálu. [1], [5]



Obr. 5 Statický regál [11]

2.2 SPÁDOVÉ REGÁLY

Spádové regály neboli též gravitační či válečkové, využívají k pohybu palet gravitaci. Paleta se po válečcích na šikmé rovině (sklon činí přibližně od 2° do 8°) pohybuje díky vlastní váze sama. Jestliže dojde k odběru jedné palety z kanálu, zaujmou její místo palety jiné, které se vlivem působení posunou k místu vykládky. Rychlost pohybu palet je omezoována brzdovými válečky. [1], [5]

Podmínkou správného ukládání palet a bezproblémového chodu je nepoškozenost ližin na všech paletách. K výhodám tohoto typu skladování patří efektivní využití plochy díky menšímu počtu uliček ve skladu, a také menší časová náročnost skladování palet. Nevýhodou je poměrně velká pořizovací cena a vysoká poruchovost. [1], [5]



Obr. 6 Spádový regál [12]

2.3 POJEZDOVÉ (PODVOZKOVÉ) REGÁLY

Jedná se o typ mechanizované regálu s elektropohonem. Skladové regály jsou instalovány na podvozky s kolečky a poskládány do bloků na společném kolejišti, které je zalité v betonové podlaze. Činnost celého zařízení a bezpečnost obsluhy monitoruje řídicí systém. Pohyb regálů je umožněn buď přímo ze skříňového rozvaděče z jednotlivých regálů, nebo dálkovým ovladačem. Manipulaci s paletami provádí zejména vysoko zdvižné vozíky. Metoda skladování materiálu je na principu FIFO (first-in/first-out). Bezpečnost chodu celého zařízení zajišťuje systém čelních a bočních světelných závor. [1], [5]



Obr. 7 Pojezdový (podvozkový) regál

Nesmírnou výhodou tohoto typu skladování je obrovská využitelnost skladovacího prostoru, což je znázorněno na Obr. 8. Díky posunu regálů po kolejišti je totiž k manipulaci s paletami zapotřebí pouze jediná ulička. Další předností je úspora jak investičních, tak i provozních nákladů a snadná manipulovatelnost s uskladněným materiálem. [1], [5]



Obr. 8 Využitelnost skladu [13]

2.4 SHRUTÍ

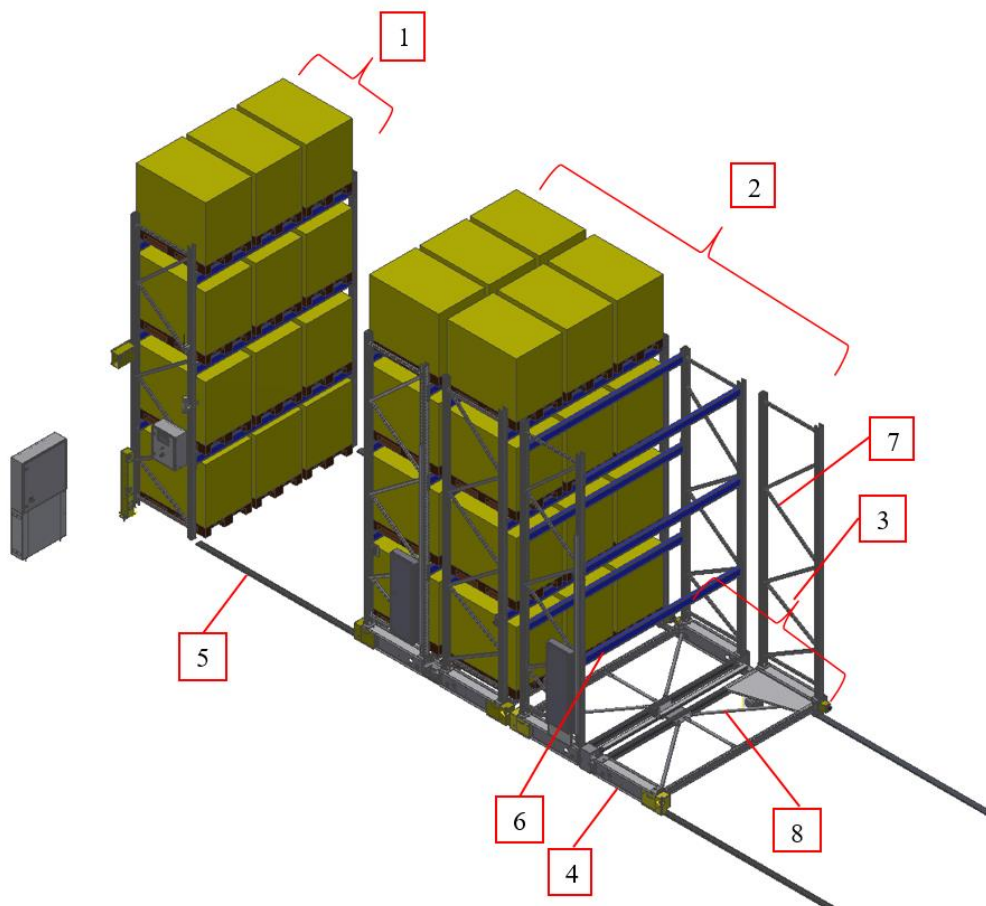
Následující tabulka (Tab. 1) představuje přehledové hodnocení skladů dle několika kritérií. Hodnocení je nastaveno v rozsahu známek 1 až 5, kde 1 je nejlepší a 5 nejhorší. Porovnávání kritéria i jejich hodnocení jsou provedena čistě subjektivně, dle informací získaných v kapitole 2.

Tab.1 Porovnání skladů

Typ skladu	Statický regál	Spádový regál	Pojezdový (podvozkový) regál
Porovnávané kritérium			
Využití skladovacího prostoru	5	2	1
Rychlost obsluhy	2	1	3
Poruchovost	1	4	3
Složitost konstrukce	1	2	4
Pořizovací cena	1	3	4

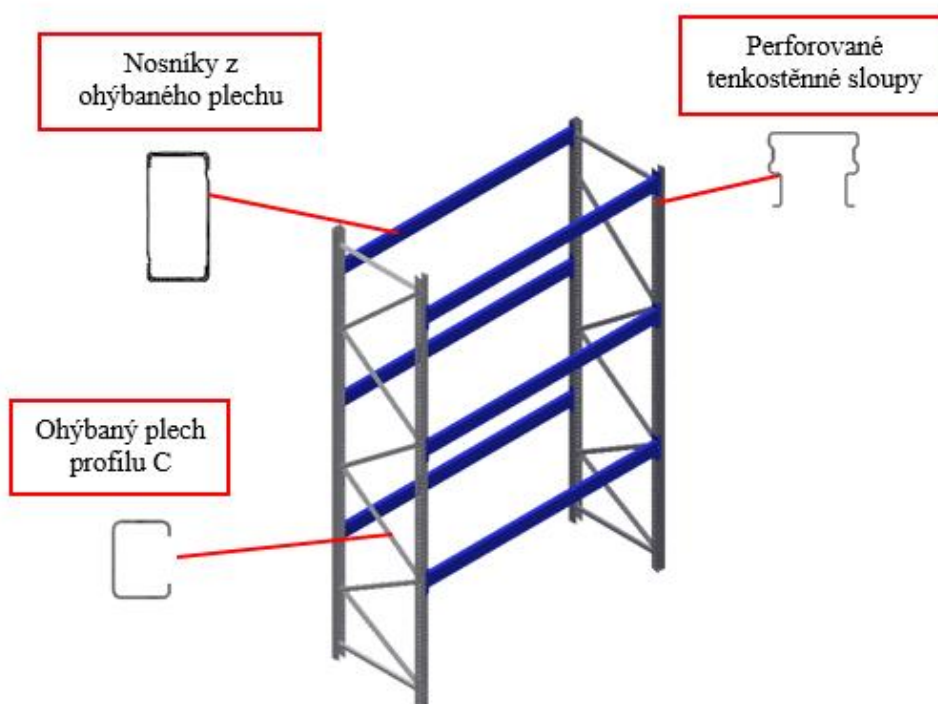
3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉHO PODVOZKOVÉHO MODULU

3.1 POJÍZDNÝ REGÁL



Obr. 9 Mobilní paletový systém; 1 - statický regál; 2 - pojízdné regály; 3 - podvozkové pole; 4 – podvozek; 5 – kolejnice; 6 – nosník; 7 - vertikální zavětrování; 8 - horizontální zavětrování

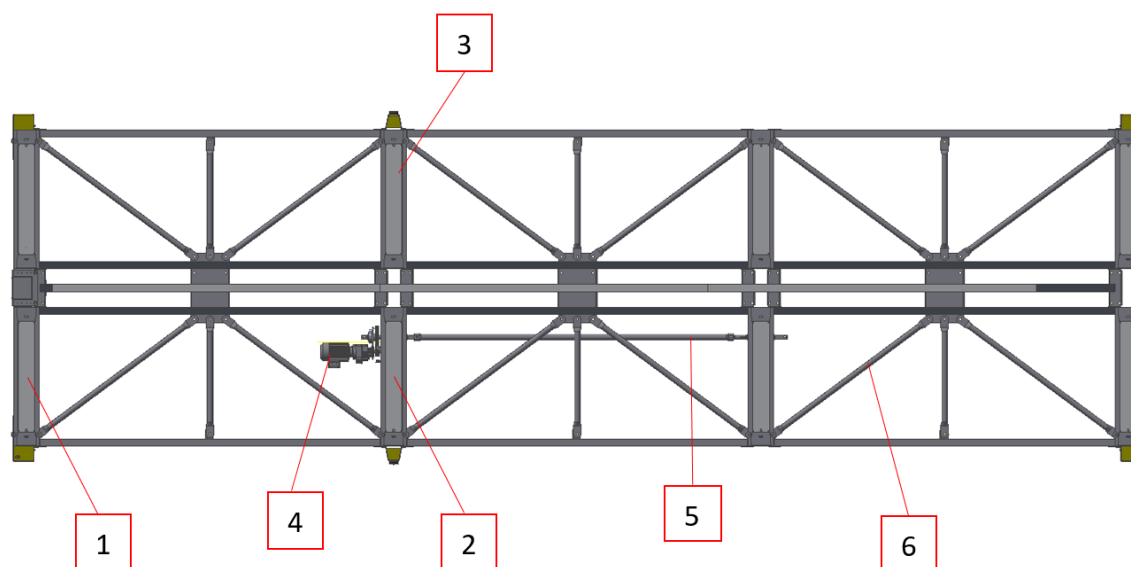
Mobilní paletový systém se skládá ze statických a pojízdných regálů. Statické regály se nachází u stěn místnosti. Jejich pohybem by vznikla ulička mezi stěnou a regálem, což není nutné. Proto se tyto regály nepohybují a jsou vždy přístupné jen z jedné strany. Pojízdné regály se pohybují na podvozkovém poli a jsou stejně jako statické regály jen jednostranné, neboť pohyb jednoho podvozkového pole zajišťuje přemístění vždy dvou řad regálů. Nosná konstrukce je tvořena tenkostěnnými sloupy PR600 s rozměry od 75x75 mm, 90x75 mm, 100x75 mm, 100x100 mm až po 120x100 mm a o tloušťce stěny profilů od 2,0 do 3,0 mm. Jedná se o perforované tenkostěnné profily, jejichž otvory jsou využívány k uchycení podélných horizontálních nosníků skrze perforované styčnickové desky. Podélné horizontální nosníky mohou být ze dvou různých typů profilů. Buď z válcovaných IPE nosníků nebo z tzv. CE nosníků, které jsou tvořené dvojicí tenkostěnných profilů, jež jsou do sebe navzájem vlisovány a vařeny a tvoří výsledný obdélníkový profil o rozměrech 140x50 mm a tloušťce 1,5 mm. Vertikální zavětrování je složeno z C profilů o rozměrech 40x30 mm a tloušťce 1,5 mm. V řešené sestavě jsou využity sloupy PR600 90x75 mm o tloušťce 2,5 mm a nosníky jsou z CE profilů.



Obr. 10 Přehled profilů v mobilních paletových systémech (SSI Schäfer s.r.o.)

3.2 PODVOZKOVÉ POLE

Sloupce regálů se pohybují na čtveřici vzájemně propojených podvozků, zpevněných středovým nosníkem, označené jako pole. Jednotlivá pole jsou mezi sebou propojena podvozky (Obr. 11).



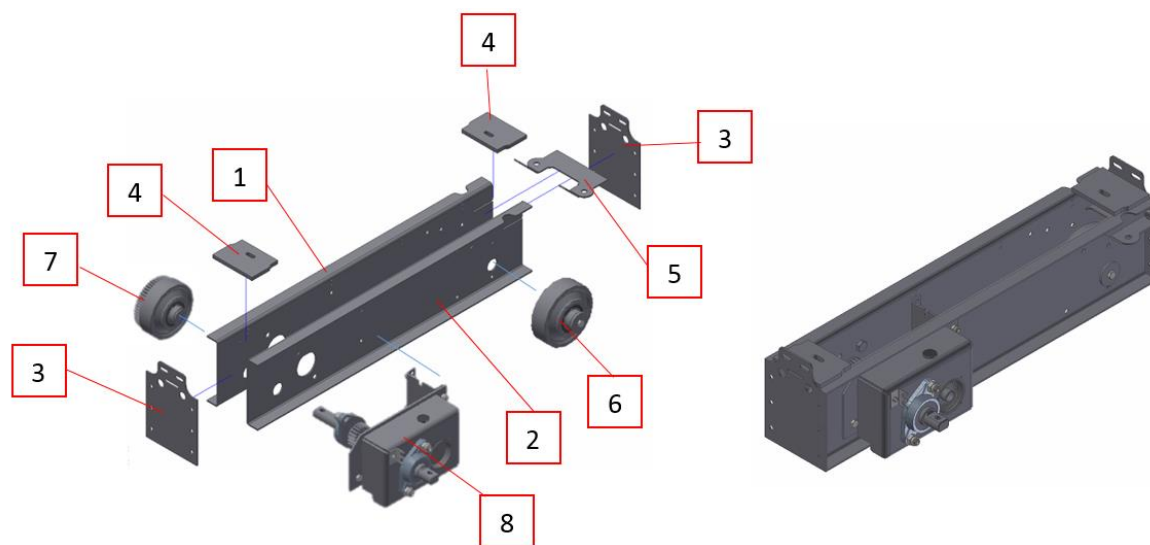
Obr. 11 Podvozkové pole: 1 – vnější podvozek s vodícím kolem; 2 – vnitřní podvozek s motorem; 3 – vnitřní podvozek s pojezdným kolem; 4 – motor; 5 – hnací hřídel; 6 – horizontální zavětrování

Středový nosník, jdoucí napříč podvozkovými poli, je složen ze dvou ohýbaných C profilů o rozměrech 60x40 mm a 62x10. Podvozky jsou mezi sebou na stranách propojeny profily IPE 100. Diagonální zavětrování se skládá z tenkostěnných trubek o průměru 21,2 mm a tloušťce 2 mm, které jsou na krajích ztenčeny.

3.3 PODVOZEK

Pohyb celého regálu zajišťují podvozky, které propojují regál s kolejnicemi, jež jsou zabetonovány v podlaze.

3.3.1 POPIS KONSTRUKCE



Obr. 12 Současná konstrukce podvozkového modulu: 1 – bočnice; 2 – bočnice; 3 – čela; 4 – úložný plech; 5 – výztuha pro uchycení zavětrování; 6 – vodící kolo; 7 – hnáné vodící kolo; 8 – motor

Současně svařovaná konstrukce se skládá ze dvou ohýbaných plechů tvaru C tvořící rám podvozkového modulu. Tloušťka těchto bočnic je 4 mm. Plechy jsou opatřeny na jedné straně výřezem, do něž se vkládá ohýbaný plech o tloušťce 4 mm, který slouží jak k vyztužení konstrukce, tak také k uchycení horizontálního zavětrování. Bočnice jsou na obou koncích svařeny čelními plechy tloušťky 4 mm. Po obvodu čel se nachází 6 otvorů pro šrouby, které slouží k uchycení spodního nosníku IPE přes styčnickový plech. Vrchní strana podvozku obsahuje ještě dva úložné plechy pro sloupky PR600 o tloušťce 12 mm, které slouží k přenesení tlakových sil z tenkostěnných sloupů do podvozkového modulu. Materiál všech výše uvedených komponent z plechů je uhlíková konstrukční ocel S235. Součástí podvozkového modulu jsou dvě pojízdná kola.

Podle funkce rozlišujeme 3 typy podvozků – vnější podvozek s vodícím kolem, vnitřní podvozek s pojízdným kolem a vnitřní podvozek s motorem. Vodící kolo zajišťuje pohyb podvozku správným směrem, pojízdná kola slouží pro pojezd.



Obr. 13 Kola podvozku: 1 – vodící; 2 – pojezdové

3.3.2 TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY PODVOZKU

Systematický technologický postup výroby v několika bodech:

1. Vypalování plechu laserem
2. Ohýbání plechů ohraňovacími lisy
3. Svařování robotem
4. Obrábění
5. Povrchová úprava

VYPALOVÁNÍ PLECHŮ LASEREM

Počet kusů a jejich délka určená k vypalování laserem je přehledně shrnuta v následující tabulce (Tab. 2).

Tab. 2 Přehled laserem upravovaných plechů původního podvozkového modulu

číslo dílu	název	počet	délka (mm)	celková délka (mm)
1	Bočnice	1	2770	2770
2	Bočnice	1	2770	2770
3	Čelo	2	899,664	1799,328
4	Ohnutá výztuha	1	1002,64	1002,64
5	Horní krytka	2	499,822	999,644
			celkem	9341,6

Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu při tepelném dělení (vypalování) odpovídají normě EN ISO 9013, která se používá pro materiály vhodné pro řezání kyslíkovým plamenem, plazmové řezání a řezání laserem.

OHÝBÁNÍ

Ohýbané díly jsou celkem tři – 2x bočnice a 1x výztuha. Každá z bočnic má dva ohyby. Výztuha má ohyb pouze jeden. Ohýbání probíhá na ohraňovacích lisech. Pro rozměry a úhly, u kterých nejsou na výkresech předepsány tolerance, platí nepředepsané tolerance dle normy ČSN ISO 2768-1 a pro geometrické tolerance norma ČSN ISO 2768-2.

SVAŘOVÁNÍ

Na svařenci podvozku se vyskytují v zásadě dva typy svaru – koutové a děrové. Koutové svary jsou o velikosti 2 a 3. Děrové o průměru bodového svaru 3 a 5. Tabulka 3 byla zpracována na základě výkresové dokumentace firmy SSI-Schäfer s.r.o. a udává přehled všech svarů vyskytujících se na původním svařenci podvozku.

Tab. 3 Svary původního podvozkového modulu

číslo	typ	velikost	počet	délka (mm)	celková délka (mm)
1	koutový	a3	4	60	240
2	koutový	a3	10	38	380
3	koutový	a3	8	30	240
4	děrový	5	1	25	25
5	koutový	a3	4	54	216
6	koutový	a3	4	52	208
7	děrový	3	2	25	50
8	koutový	a3	2	18	36
9	koutový	a3	2	105	210
Celkem	koutový	a3	34	357	1530
	děrový	5	1	25	25
	děrový	3	2	25	50

Pro rozměry a úhly svařenců, u kterých nejsou na výkresech předepsány tolerance, platí nepředepsané tolerance dle normy ČSN EN ISO 13920. Norma se týká také nepředepsaných geometrických tolerancí svařenců.

Ve firmě SSI-Schäfer s.r.o. se ke svařování podvozku používá robot CLOOS 2500. Jedná se o robota o výšce 7 m s možností pohybu v pěti osách. Robot používá svařovací metodu MAG (135). Svařování probíhá ve svařovacím boxu. Jednotlivé komponenty jsou na pracoviště navezeny v paletách pomocí vysoko zdvižných vozíků. Daný postup výroby svařence můžeme rozdělit do dvou procesů – ruční seskládání jednotlivých komponent za pomoci kvalifikovaného pracovníka a svařování robotem. Díky otočnému svařovacímu stolu mohou probíhat oba procesy současně. Zatímco kvalifikovaný pracovník pečlivě ukládá jednotlivé komponenty díky širokému spektru svěráků a upínačů do svařovacího stojanu na jedné straně stolu, na druhé straně dochází za pomoci robota nejprve k nastehování plechů a poté ke kompletnímu svaření podvozku.

Celkový čas potřebný na svaření jednoho podvozku byl ověřen měřením a je 16 minut. Tento čas zahrnuje nejprve práci člověka, poté robota. Jelikož skládání komponent pracovníkem a svařování robotem probíhá ve stejný čas, pouze na opačné straně stolu, tak se při sériové výrobě čas svaření jednoho podvozku zkrátí na polovinu.



Obr. 14 Otočný svařovací stůl s připevněnými komponentami podvozku

OBRÁBĚNÍ

Obrábění tvoří pouze malou část výrobního procesu. Obrábějí se pouze otvory určené pro hřídele kol. Také zde platí pro rozměry a úhly, u kterých nejsou na výkresech předepsány tolerance, nepředepsané tolerance dle normy ČSN ISO 2768-1 a pro geometrické tolerance norma ČSN ISO 2768-2.

Tab 4. Přehled obráběcích operací u původního podvozkového modulu

číslo	typ	velikost	počet
1	vrtání	38,1	2

POVRCHOVÁ ÚPRAVA

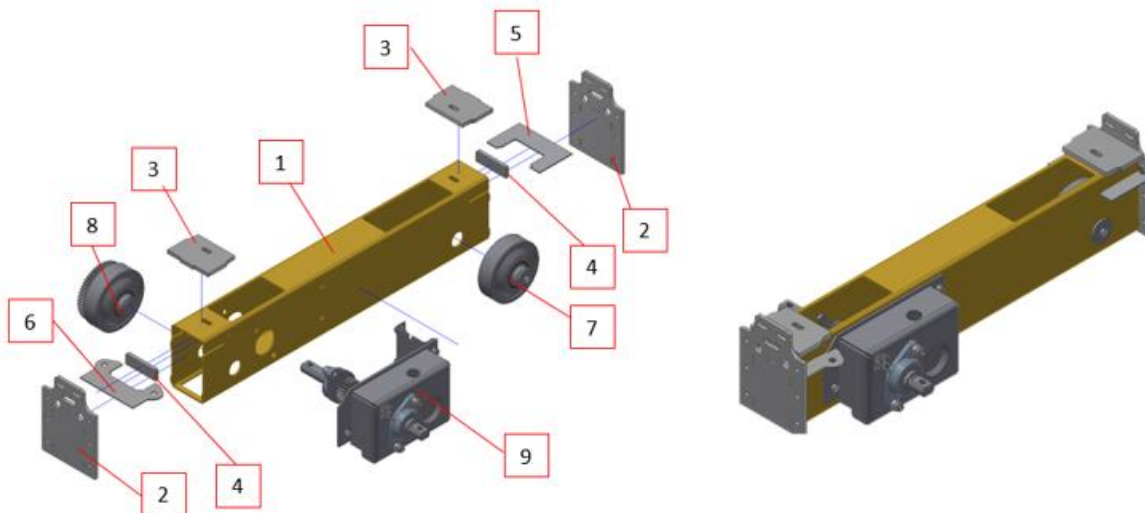
Posledním výrobním procesem je povrchová úprava podvozku. V případě pojízdného podvozkového modulu je jím práškové lakování. Jedná se o jednovrstvou povrchovou úpravu, která poskytuje mechanickou i chemickou ochranu povrchu a udává výslednému produktu celkový vzhled.

4 NÁVRH VLASTNÍHO ŘEŠENÍ

Požadavek na změnu stávajícího podvozku je především kvůli zjednodušení výrobního procesu a navýšení jeho únosnosti. Stávající podvozek (podvozkový modul) má předepsanou nosnost 24 tun. V rámci bakalářské práce bylo provedeno ověření nosnosti podvozku pro zatížení navýšené na 30 tun.

4.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Nově sestavené řešení se skládá z bezešvého dutého ocelového profilu obdélníkového půdorysu o tloušťce stěny 5 mm z materiálu S355. Dutý profil má ze spodní strany dva obdélníkové otvory umožňující kolům pohyb po kolejkách. Horní dva obdélníkové otvory slouží ke snadnému přístupu ke kolům a to nejen kvůli pravidelné údržbě, ale také ke snadné opravě a výměně vnitřních součástí bez nutnosti demontovat celou regálovou sestavu. Návrh měl obsahovat co nejmenší změny týkající se konstrukčních dílů, přesto však došlo k jejich mírné modifikaci. Všechny následující komponenty jsou vytvořeny z plechu S235. Úložné plochy jsou opět vyrobeny z plechu o tloušťce profilu 12 mm. Od stávajících se liší rozměrově. Přibyl jim na zadní straně zámek, který slouží k pevnějšímu uchycení k čelu. Čela podvozku jsou taktéž rozměrově podobná jako u původní verze podvozku. Profil podvozku má z boční strany zámky, sloužící k pevnějšímu uchycení čel. U vnitřní horizontální výztuhy došlo ke zjednodušení, byl odstraněn její ohyb. Do konstrukce nového podvozku byly přidány další komponenty – vnitřní horizontální výztuha na obou stranách dutého profilu a dvě vnitřní vertikální výztuhy pro lepší přenos sil ze sloupů regálu. Tyto komponenty slouží obecně ke zpevnění a vyztužení podvozku. Poslední součástí, patřící neodmyslitelně k podvozku, jsou dvě kola.



Obr. 15 Nově navrhnutý podvozek: 1 – bezešvý dutý profil; 2 – čelo; 3 – úložný plech; 4 – vertikální výztuha; 5 – horizontální výztuha; 6 – horizontální výztuha s možností uchycení zavětrování; 7 – vodící kolo; 8 – hnané vodící kolo; 9 – motor

Konstrukce regálového systému nad podvozkiem zůstane stejná. Předmětem této bakalářské práce není posouzení nosnosti samotné regálové konstrukce.

4.2 TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY

Systematický technologický postup výroby v několika bodech:

1. Vypalování plechu laserem
2. Svařování
3. Obrábění
4. Povrchová úprava

Geometrické požadavky na výrobu u jednotlivých operací jsou shodné jako u technologického postupu původního podvozkového modulu probrané podrobně v podkapitole 3.3.2. Obrábění a povrchová úprava se od stávajícího řešení nemění a je probrána již v podkapitole 3.3.2.

VYPALOVÁNÍ PLECHŮ LASEREM

Počet kusů a jejich délka určená k vypalování laserem je shrnuta v následující tabulce.

Tab. 5 Přehled laserem vypalovaných plechů navrhovaného podvozkového modulu

číslo dílu	název	počet	délka (mm)	celková délka (mm)
1	Bezešvý dutý profil	1	4530	4530
2	Čelo	2	867,664	1735,328
3	Horní krytka	2	507,822	1015,644
4	Vertikální výztuha	2	284,708	569,416
5	Horizontální výztuha 1	1	404	404
6	Horizontální výztuha 2	1	749,291	749,291
			celkem	9003,7

SVAŘOVÁNÍ

Tab. 6 Svary navrhovaného podvozkového modulu

číslo	typ	velikost	počet	délka (mm)	celková délka (mm)
1	oblý svar 1/2 V	s5	4	105	420
2	koutový	a3	12	30	360
3	děrový	5	2	25	50
4	koutový	a3	6	30	120
5	koutový	a3	4	26	120
6	koutový	a3	2	50	180
7	koutový	a3	4	110	240
8	děrový	6	4	21	252
9	koutový	a3	6	72	900
10	děrový	5	2	25	50
celkem	oblý svar 1/2 V	a3	4	105	420
	koutový	a3	54	312	2274
	děrový	5	4	50	100
	děrový	6	12	21	252

4.3 ZHODNOCENÍ VÝROBY PODVOZKŮ

Z výše uvedených bodů si lze všimnout, že nám z technologického postupu výroby zcela vypadl proces ohýbání. Důsledkem navýšení nosnosti podvozku ale vzrostla nutnost přidání výztuh. Výztuhy nám zdelší technologický proces nejen ve fázi vypalování, ale také i svařování. Počet komponent vypalovaných laserem se ze sedmi zvýšil na devět. Celková délka určená k vypalování se mírně zmenšila (o 3,62 %). Přidáním výztuh došlo také k navýšení počtu svarů. Proces povrchové úpravy zůstává totožný pro oba dva podvozkové moduly. U nově navrženého podvozkového modulu se jeví možnost úplného vynechání procesu obrábění. Dosavadní obráběné díry by mohly být u bezešvého dutého profilu vypalovány laserem. Musí být však splněny geometrické tolerance. Doposud však nebylo provedeno žádné testování, které by nám dovolilo plnohodnotnou náhradu dosavadního procesu obrábění za laserové vypalování.

5 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ

5.1 OBECNÉ INFORMACE A PRÁCE V PROGRAMU RFEM

Program RFEM slouží pro statický výpočet různých konstrukcí. Práci v programu RFEM lze charakterizovat jako systém pro preprocessing a postprocessing. Tento program pomáhá inženýrům – statikům analyzovat kritická místa a možná nebezpečí jednoduchých i složitých konstrukčních systémů díky metodě konečných prvků (MKP). Numerické modely mohou být tvořeny nejen pruty, ale i plochami a tělesy. Základní program dokáže spočítat výsledné vnitřní síly, podporové reakce, deformace i napětí v prutech, na plochách a tělesech. Přehled postupu práce v tomto programu: [14]

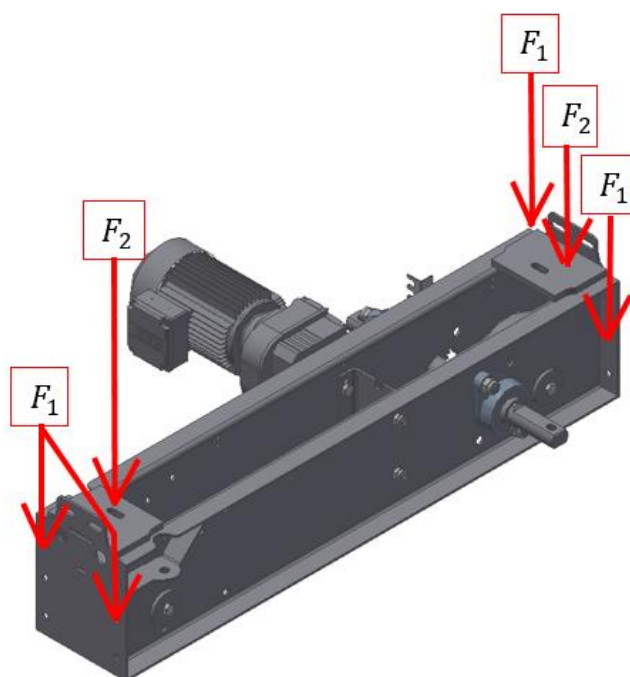
1. Vymodelování 2D/3D prutové a/nebo skořepinové konstrukce
2. Zvolení používaných materiálů
3. Zavedení okrajových podmínek (uložení, klouby, kontakty apod.)
4. Vytvoření zatěžovacích stavů, zatížení konstrukce
5. Vytvoření kombinace zatížení
6. Nastavení parametrů sítě konečných prvků a její optimalizace
7. Zvolení výpočetní metody
8. Provedení výpočtu
9. Vyhodnocení výstupů

Nejprve byl podvozek vymodelován v programu Inventor a poté naimportován do CAD programu AUTOCAD Mechanical 2019, kde byly vytvořeny střednice jednotlivých komponent a model byl zjednodušen pro potřeby numerické analýzy. Další fází byl import CAD dat do programu RFEM, který nabízí přímý link z CAD programů. V programu RFEM došlo k vytvoření ploch ze střednic. Podvozek byl globálně vysítován s tím, že v místech otvorů bylo síťování zjemněno. Jednotlivým plochám byl přiřazen materiál a jeho tloušťka. Nosná konstrukce nad podvozkem byla namodelována prutově.

5.2 STANOVENÍ VNĚJŠÍCH ZATÍŽENÍ

Zatížení se z palet umístěných v regálové konstrukci do podvozku přenáší v závislosti na jejich umístění. Rozlišujeme zde palety umístěné ve spodním patře regálu a palety umístěné v dalších podlažích. Palety ve spodním patře přenáší zatížení pouze skrze nosníky IPE přímo na čelo podvozku. Oproti tomu výsledná síla palet v dalších podlažích je přenášena skrze nosníky IPE na sloupy, které ji přenáší na úložné plechy podvozku. K lepší orientaci a pochopení způsobu zatěžování podvozku slouží Obr. 14, kde je síla od zatížení palet spodního patra regálu značena jako F_1 a síla od palet ve vyšších patrech F_2 .

Součet všech vnějších zatížení na podvozek má být dle zadání max. 24 nebo 30 tun. Z informací uvedených v předchozím odstavci je patrné, že zadávání velikosti vstupního zatížení na podvozek se bude měnit v závislosti na velikostech sil F_1 a F_2 , které je nutno spočítat. Tyto síly závisí jednak na šířce a výšce regálů, jednak na počtu a nosnosti jednotlivých palet.

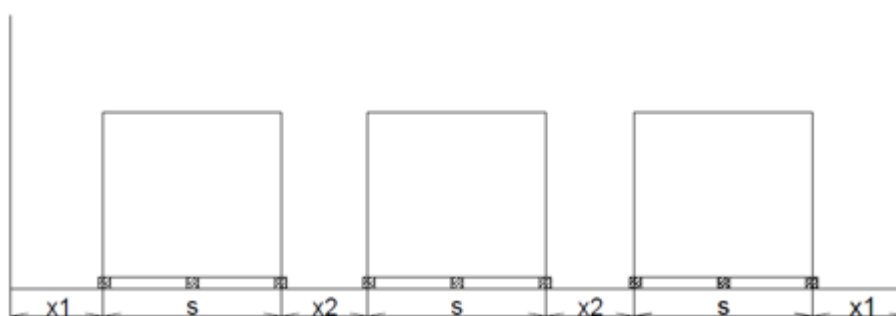


Obr. 16 Zatížení podvozku

Pro výpočet poměru sil působících na čelo podvozku F_1 a na úložný plech F_2 vycházíme z grafu maximálních nosností regálových nosníků. Tento graf byl vytvořen a poskytnut z interní podnikové návrhové dokumentace firmy SSI Schäfer s.r.o. [15]

Základem dalších výpočtů byl jak tento graf, tak i norma ČSN EN 15620 a známá šířka europalety (tj. 800 mm). Z důvodu získání stoprocentní využitelnosti prostoru mezi podvozky, tedy vyplněním tohoto prostoru celočíselným počtem palet, bylo potřeba nejprve spočítat minimální délky regálového nosníku pro daný počet europalet. [7]

Ukázka výpočtu minimální délky ocelového nosníku pro 3 palety:



Obr. 17 Schématický náčrt rozestavení europalet na nosníku

$$L_3 = 2 \cdot x_1 + n \cdot 800 + (n - 1) \cdot x_2 \quad (1)$$

$$L_3 = 2 \cdot 75 + 3 \cdot 800 + (3 - 1) \cdot 75 = 2700 \text{ mm}$$

Kde:	L_3	[mm]	minimální délka regálového nosníku pro 3 palety
	n	[ks]	počet palet
	s	[mm]	šířka europalety - dle normy 800 mm
	$x1$	[mm]	minimální vzdálenost mezi sloupkem rámu a paletou – dle normy 75 mm
	$x2$	[mm]	minimální vzdálenost mezi dvěma paletami – dle normy 75 mm

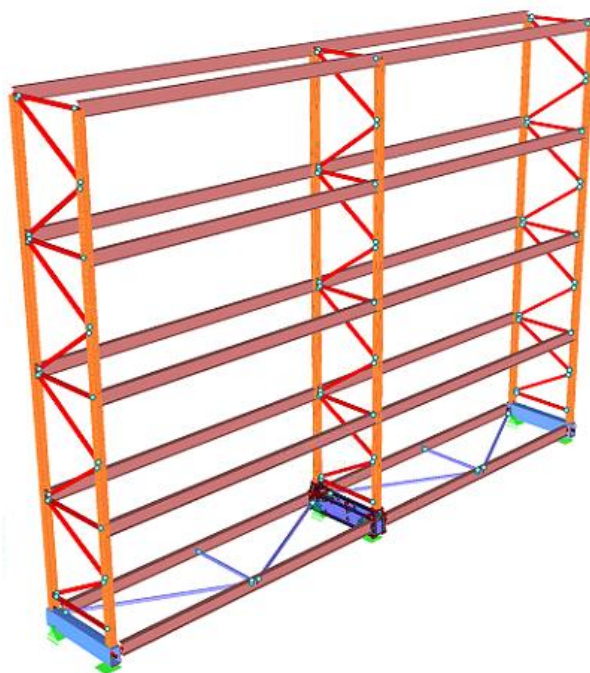
V Tab. 7 jsou uvedeny nejmenší možné délky regálových nosníků pro různé počty palet.

Tab. 7 Přehled nejmenší možné délky regálových nosníků při daném počtu palet

Počet palet n [ks]	Délka IPE L [mm]
0	0
1	950
2	1825
3	2700
4	3575
5	4450
6	5325
7	6200
8	7075
9	7950
10	8825

Následně byla vypracována v programu Excel tabulka obsahující výpočty vedoucí ke kombinaci možných vstupních zatížení F_1 a F_2 působících na podvozek. Výpočet byl proveden pro regálové nosníky z profilů IPE 100, IPE 120 a IPE 140. Nejčastěji používaný počet palet na jedno regálové pole je 3, 4, a 5 palet. Výška regálu byla dopočítána na základě maximálního využití prostoru, tedy tak, aby celková nosnost na jeden podvozkový modul byla menší nebo rovna 30 tunám. Tímto způsobem byla vytvořena matice skutečných možných kombinací vstupního zatížení. Na základě dat těchto výsledků byla vybrána jedna rozhodující kombinace, která splňovala požadavek v zadání bakalářské práce, a součet sil F_1 a F_2 působících na podvozek byl tedy 30 tun. Bakalářská práce se nezabývá konkrétním skladem, ale pouze optimalizací podvozkového modulu.

Numerický model byl vypracován jako prutovo-skořepinová 3D konstrukce. Střední podvozkový modul byl vytvořen ze skořepin s odpovídajícími materiály a tloušťkami plechů. Nosná regálová konstrukce je vytvořena prutově, přičemž každému prutu byl přiřazen odpovídající profil průřezu z databáze software SHAPE-THIN. Z důvodu snížení výpočtové náročnosti, jsou krajní podvozkové moduly tvořeny jen pruty s obdélníkovým průřezem 200x120x5, který rozměrově odpovídají konstrukci řešeného podvozku.



Obr. 18 Axonometrický pohled na vymodelovanou konstrukci

5.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Pro úspěšné řešení deformační a napětíové analýzy je třeba zadat správné geometrické okrajové podmínky za pomoci podpor tak, aby odpovídaly reálnému uložení celé konstrukce. Uložení konstrukce regálu je ve své podstatě staticky určité. Pro zadání okrajových podmínek v řešeném modelu bylo využito dvou typů bodových podpor. Tyto podpory se nachází v místech reálného výskytu kol, kde osa x ukazuje směr pohybu podvozku po kolejnici, osa y je horizontální a osa z vertikální.

Tab. 8 Uzlové podpory

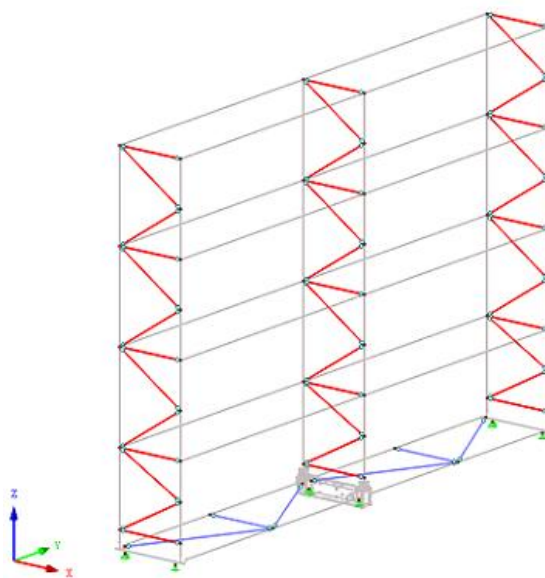
Podpora č.	Uzly č.	Osový systém	Sloup v Z	Podepření resp. Vetknutí					
				u_x	u_y	u_z	φ_x	φ_y	φ_z
1	341,370,541	Globální X,Y,Z	-	x	x	x	-	-	x
2	309,346,542	Globální X,Y,Z	-	-	x	x	x	-	x

Na začátky i konce prutů byly zadány klouby dvojího druhu podle toho, v které ose jim je umožněno uvolnění. Nosníkům vertikálního zavětrování je přiřazen kloub na začátku i na konci prutu a umožňuje rotaci v ose z , nosníkům horizontálního zavětrování umožňuje kloub rotaci pouze kolem osy y .

Tab. 9 Klouby na koncích prutu

Kloub č.	Vztažný systém	Normálový/smykový kloub resp. pružina[MN/m]			Momentový kloub resp. pružina[MNm/rad]		
		u_x	u_y	u_z	φ_x	φ_y	φ_z
1	Lokální x,y,z Nelinearita	-	-	-	-	-	x
		-	-	-	-	-	-
2	Lokální x,y,z Nelinearita	-	-	-	-	x	-
		-	-	-	-	-	-

Při výpočtu byl zohledněn lineární a bilineární materiálový model se zpevněním. Nejprve byly řešeny modely s použitím lineárního materiálu. V další fázi výpočtu byl zvolen pro části podvozku tvořené skořepinami bilineární materiálový model zohledňující případné lokální plastizace v částech konstrukce podvozku.



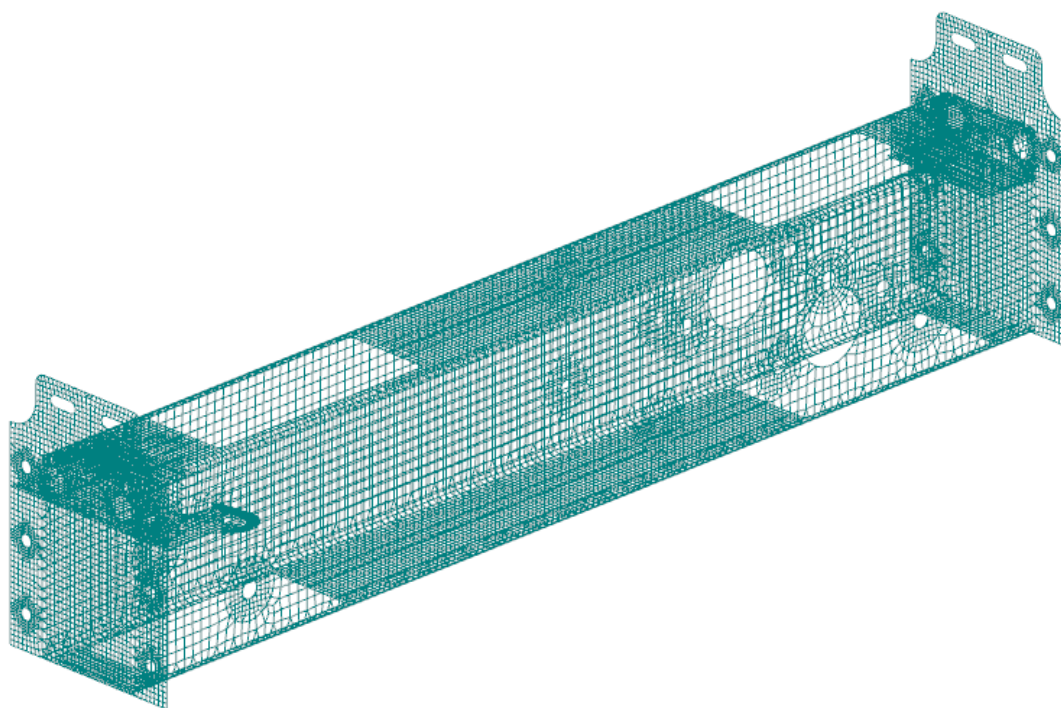
Obr. 19 Zadané okrajové podmínky

5.4 SÍŤ KONEČNÝCH PRVKŮ

Požadovaná délka konečných prvků byla globálně zvolena na 5 mm a to jak pro původní podvozek, tak pro podvozek nově navržený. Kolem otvorů, vrubů a v místech se složitou geometrií byla síť konečných prvků ručně zjemněna. Celkový počet prvků sítě původního modelu podvozku je 33943, nově navrženého modelu podvozku je 25551.

Tab. 10 Nastavení sítě konečných prvků v programu RFEM5

Obecné	Požadovaná délka konečných prvků	l_{FE}	: 5.000 mm
	Maximální vzdálenost mezi uzlem a linií pro integrování do linie	ε	: 0.500 mm
	Maximální počet uzlů sítě KP v tisících		: 500
Plochy	Maximální poměr diagonál obdélníku KP	Δ_D	: 1.800
	Maximální přípustný odklon 2 prvků sítě od roviny	α	: 0.50 °
	Tvar konečných prvků:		: Trojúhelníky a čtyřúhelníky x Generovat stejné čtverce, kde je to možné
	x Preferována strukturovaná síť		



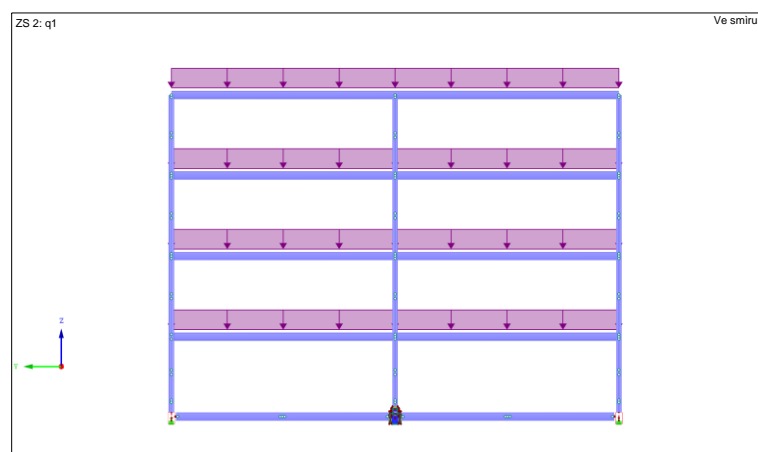
Obr. 20 Síť konečných prvků nově navrženého podvozkového modulu

5.5 ZADANÁ VNĚJŠÍ ZATÍŽENÍ

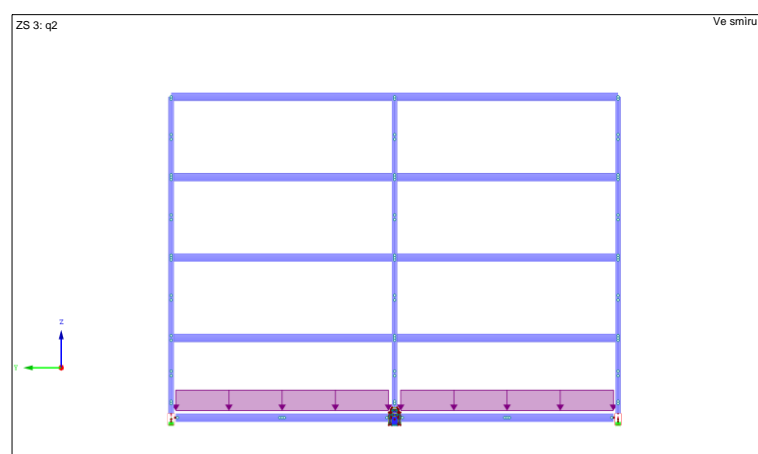
Původní model je zatěžován maximálním zatížením 24 tun na podvozkový modul. Nově navržený podvozkový modul je pro srovnání zatěžován také 24 tunami. Dle požadavků je u nového podvozkového modulu zvýšeno užité zatížení na 30 tun.

Tab. 11 Zatěžovací stavy

Zatěž. stav	Označení zatěž. stavu	EN 1990 ČSN Kategorie účinků	Vlastní tíha - Součinitel ve směru			
			Aktivní	X	Y	Z
ZS1	Vlastní tíha	Stálé	x	0.00	0.00	-1.000
ZS2	q1	Užitná zatížení - kategorie E: plochy pro skladování a průmyslovou činnost	-			
ZS3	q2	Užitná zatížení - kategorie E: plochy pro skladování a průmyslovou činnost	-			



Obr. 21 Schéma rozložení zatěžovacího stavu ZS2



Obr. 22 Schéma rozložení zatěžovacích stavů ZS3

5.6 PARAMETRY VÝPOČTU – TYP ŘEŠIČE

Tab. 12 Parametry výpočtu pro zatěžovací stavy

Zatěž. stav	Označení zatěž. stavu	Parametry výpočtu
ZS1	Vlastní tíha	<p>Způsob výpočtu : x Analýza velkých deformací</p> <p>Metoda pro řešení systému : x Newton-Raphsonova kombinovaná nelineárních algebraických s Picardovou rovnic</p> <p>Aktivovat součinitele tuhosti: : x Průřezy (součinitel pro J, I_y, I_z, A, A_y, A_z)</p> <p>: x Pruty (faktor pro GJ, EI_y, EI_z, EA, GA_y, GA_z)</p>
ZS2	q1	<p>Způsob výpočtu : x Teorie I. řádu (geometricky lineární výpočet)</p> <p>Metoda pro řešení systému : x Newton-Raphson nelineárních algebraických rovnic</p> <p>Aktivovat součinitele tuhosti: : x Průřezy (součinitel pro J, I_y, I_z, A, A_y, A_z)</p> <p>: x Pruty (faktor pro GJ, EI_y, EI_z, EA, GA_y, GA_z)</p>
ZS3	q2	<p>Způsob výpočtu : x Teorie I. řádu (geometricky lineární výpočet)</p> <p>Metoda pro řešení systému : x Newton-Raphson nelineárních algebraických rovnic</p> <p>Aktivovat součinitele tuhosti: : x Průřezy (součinitel pro J, I_y, I_z, A, A_y, A_z)</p> <p>: x Pruty (faktor pro GJ, EI_y, EI_z, EA, GA_y, GA_z)</p>

Tab. 12 Parametry výpočtu pro kombinace zatížení

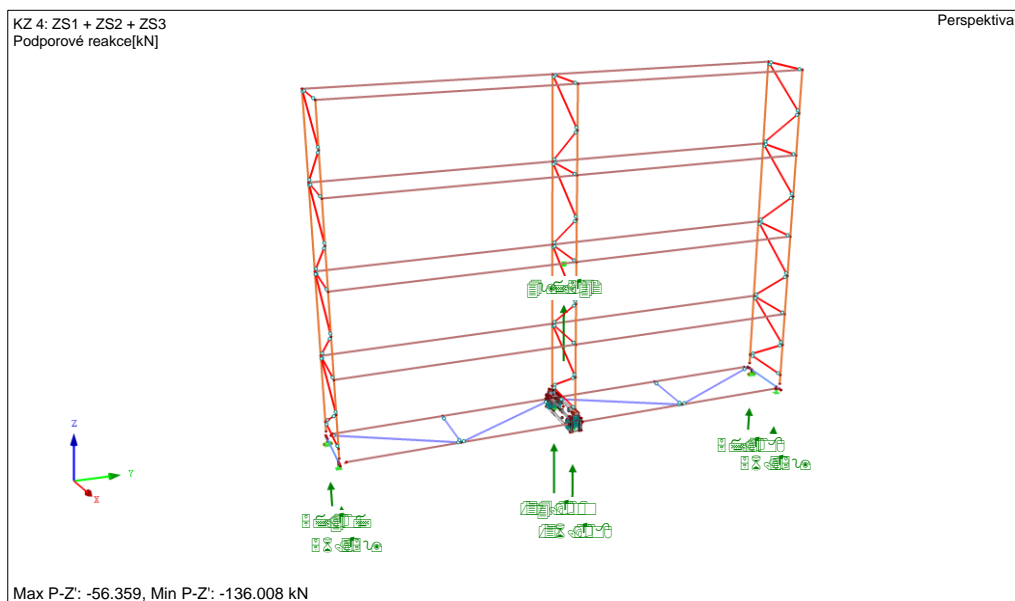
Kombin. zatížení	Kombinace zatížení Označení	č.	Součinitel	Zatěžovací stav
KZ1	1.3*ZS1 + 1.4*ZS2 + 1.4*ZS3	1	1.30	ZS1 Vlastní tíha
		2	1.40	ZS2 q1
		3	1.40	ZS3 q2
KZ2	ZS1 + ZS2 + ZS3	1	1.00	ZS1 Vlastní tíha
		2	1.00	ZS2 q1
		3	1.00	ZS3 q2

5.7 VÝSLEDKY Z PROGRAMU RFEM

V následující podkapitole jsou zobrazeny vybrané výsledky jednotlivých numerických modelů stávajícího a nového typu podvozku. Deformace jsou znázorněny pro lineární i bilineární materiálové modely s charakteristickým zatížením. Napětí von Mises jsou vyobrazeny pro lineární materiálové modely s návrhovým zatížením a elastické přetvoření pro bilineární materiálové modely s návrhovým zatížením.

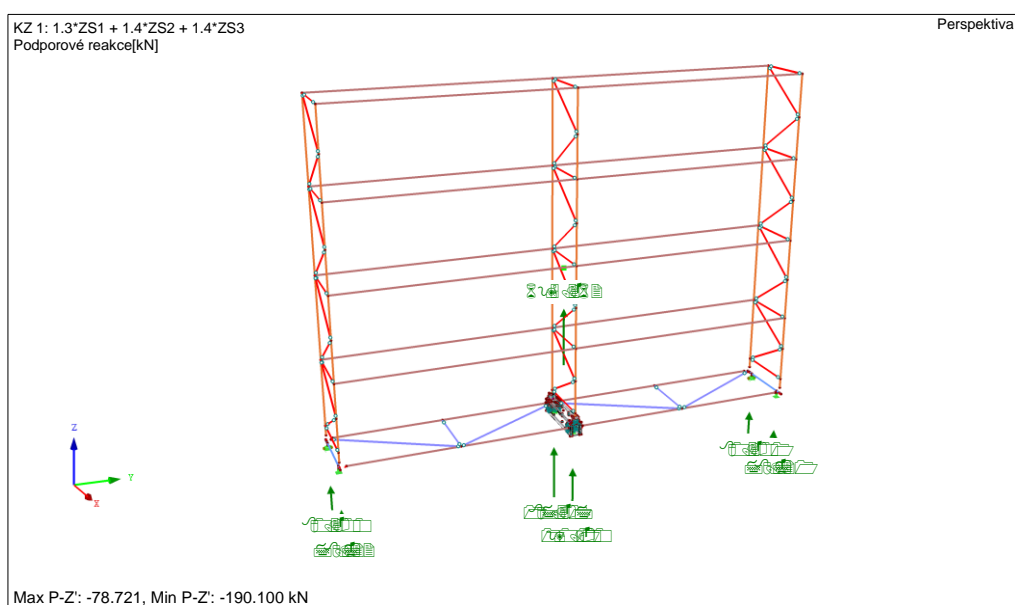
5.7.1 PODPOROVÉ REAKCE – PŮVODNÍ MODEL 24 TUN

CHARAKTERISTICKÉ ZATÍŽENÍ



Obr. 21 Podporové reakce původního podvozkového modulu s charakteristickým zatížením

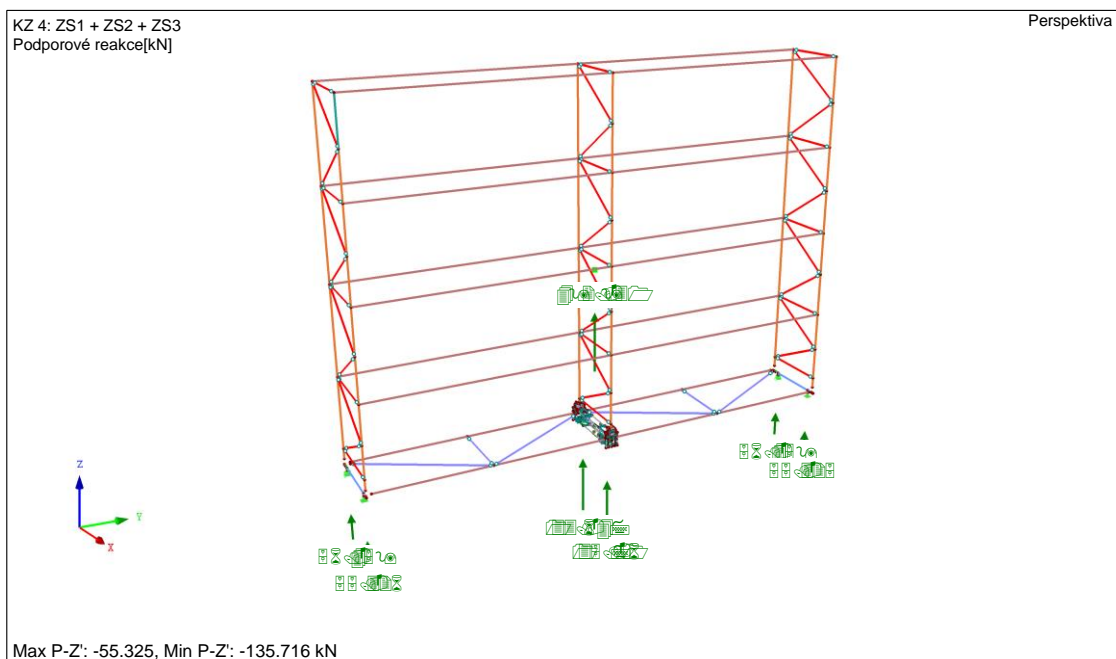
NÁVRHOVÉ ZATÍŽENÍ



Obr. 22 Podporové reakce původního podvozkového modulu s návrhovým zatížením

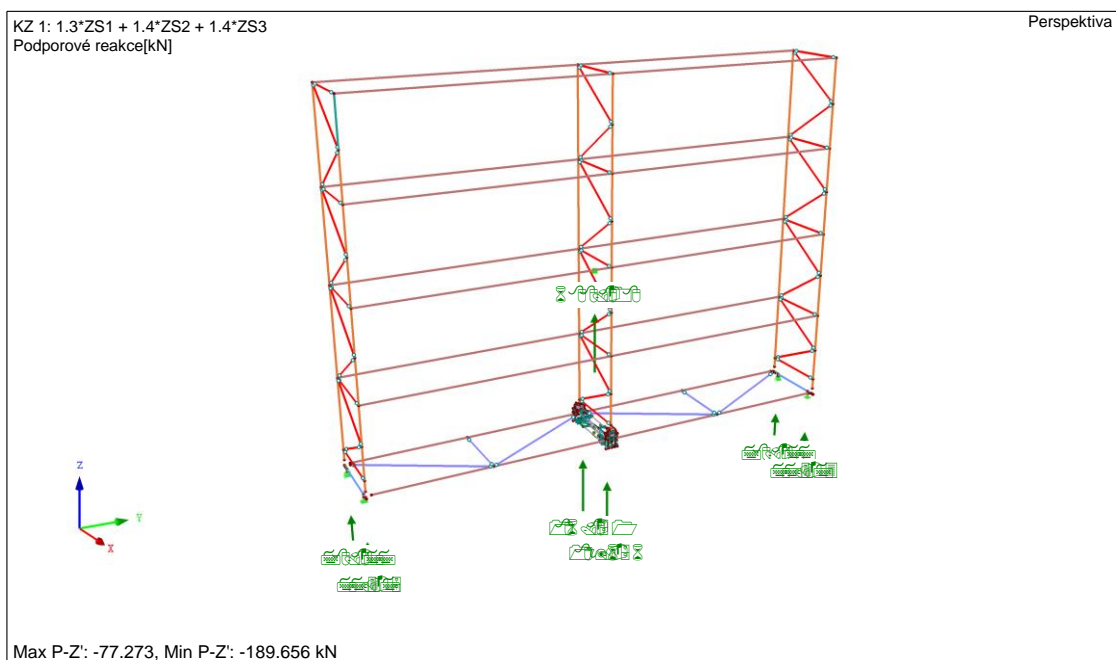
5.7.2 PODPOROVÉ REAKCE – NOVÝ MODEL 24 TUN

CHARAKTERISTICKÉ ZATÍŽENÍ



Obr. 23 Podporové reakce nově navrženého podvozkového modulu s charakteristickým zatížením

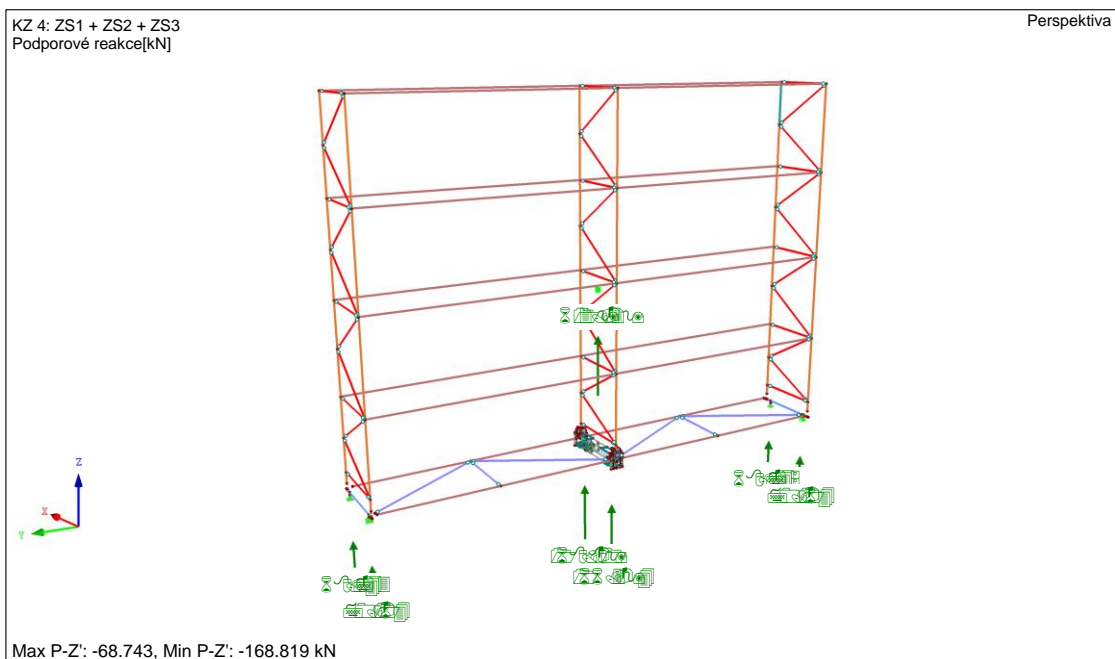
NÁVRHOVÉ ZATÍŽENÍ



Obr. 24 Podporové reakce nově navrženého podvozkového modulu s návrhovým zatížením

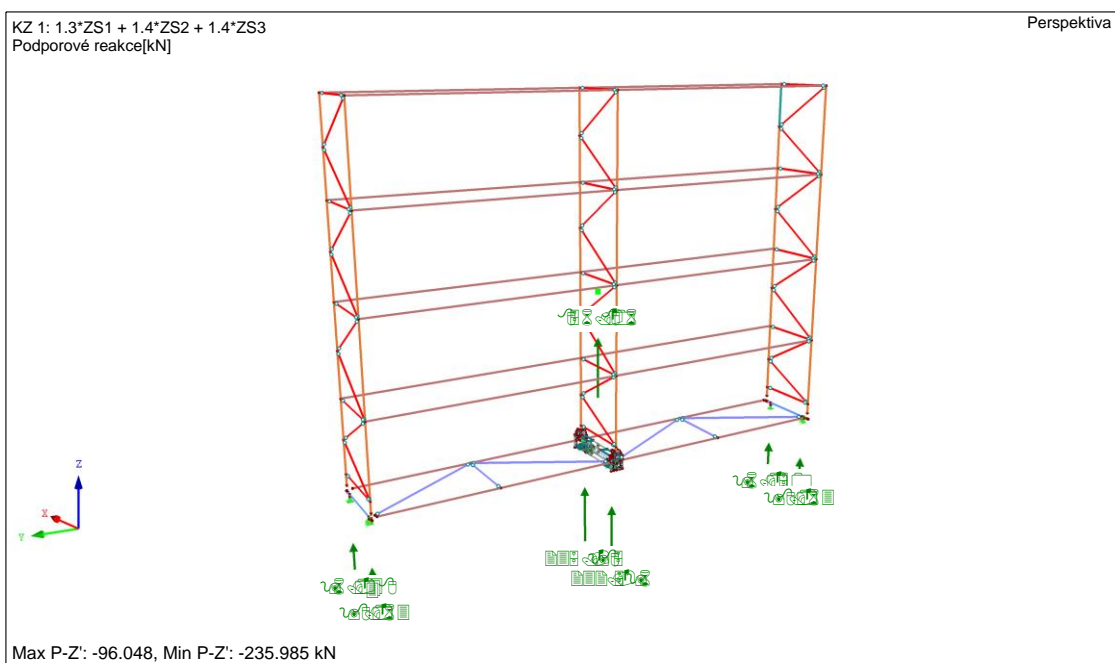
5.7.3 PODPOROVÉ REAKCE – NOVÝ MODEL 30 TUN

CHARAKTERISTICKÉ ZATÍŽENÍ



Obr. 25 Podporové reakce nově navrženého podvozkového modulu s charakteristickým zatížením

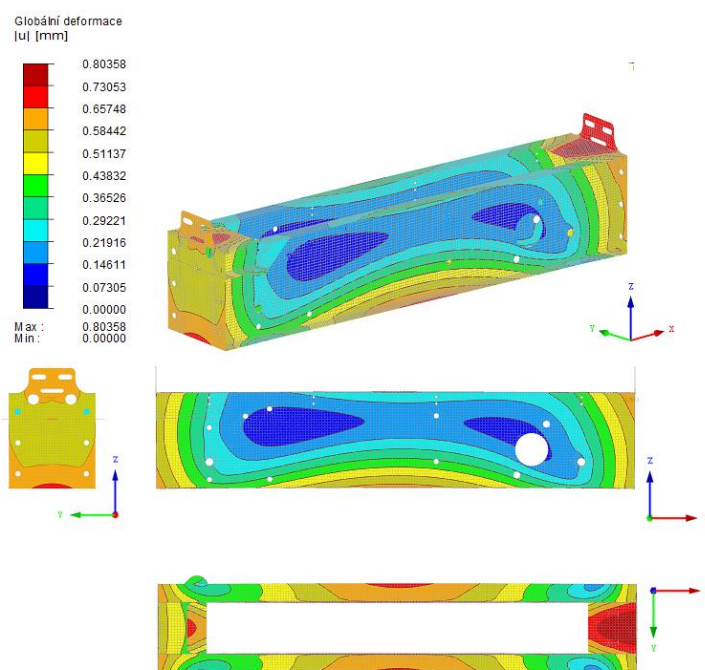
NÁVRHOVÉ ZATÍŽENÍ



Obr. 26 Podporové reakce nově navrženého podvozkového modulu s návrhovým zatížením

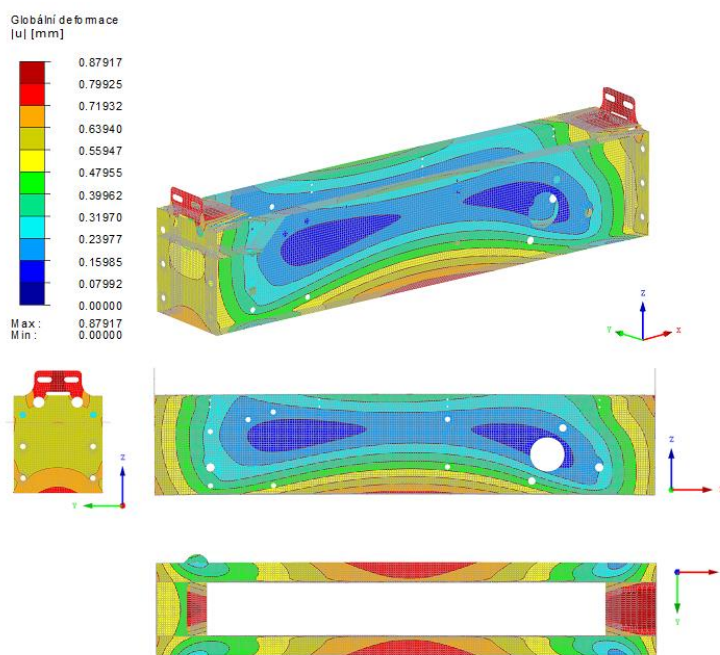
5.7.4 DEFORMACE – PŮVODNÍ MODEL 24 TUN – CHARAKTERISTICKÉ ZATÍŽENÍ

LINEÁRNÍ MATERIÁLOVÝ MODEL



Obr. 27 Deformace původního podvozkového modulu s charakteristickým zatížením pro lineární materiálový model

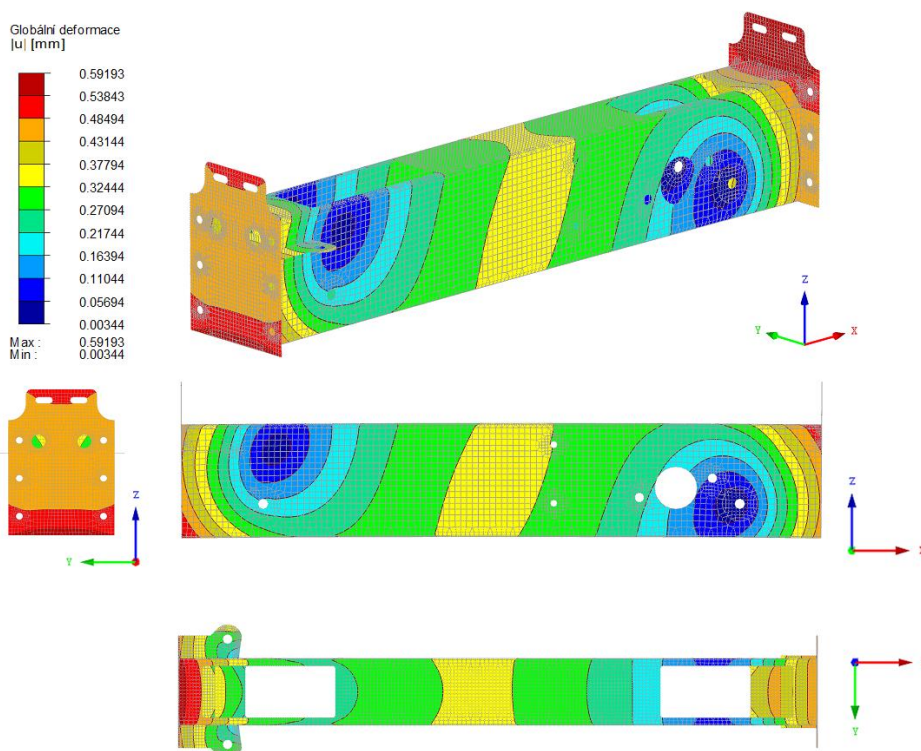
BILINEÁRNÍ MATERIÁLOVÝ MODEL



Obr. 28 Deformace původního podvozkového modulu s charakteristickým zatížením pro bilineární materiálový model

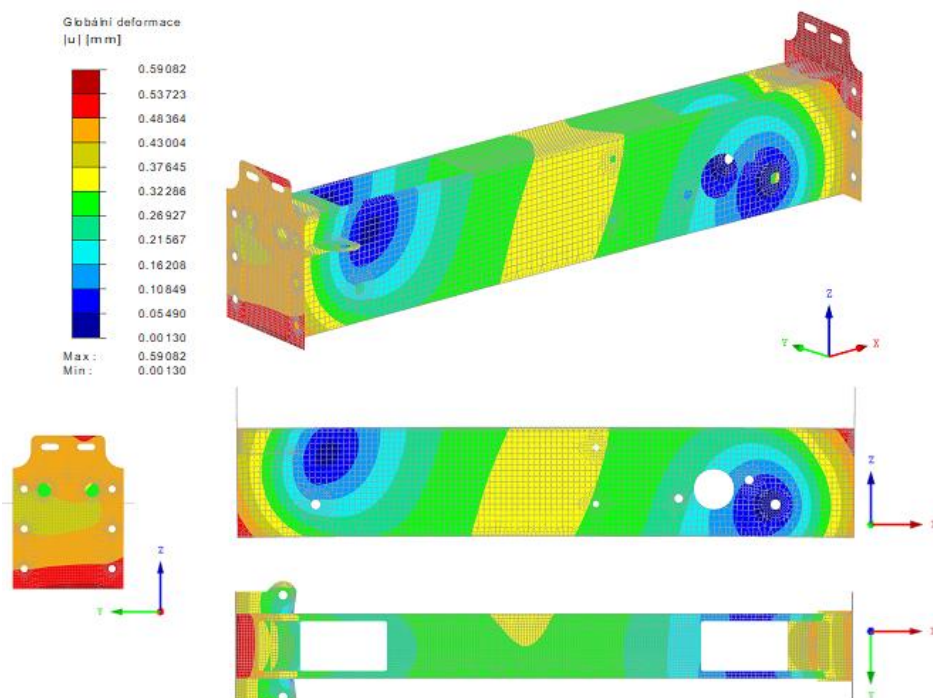
5.7.5 DEFORMACE – NOVÝ MODEL 24 TUN – CHARAKTERISTICKÉ ZATÍŽENÍ

LINEÁRNÍ MATERIÁLOVÝ MODEL



Obr. 29 Deformace nového podvozkového modulu s charakteristickým zatížením pro lineární materiálový model

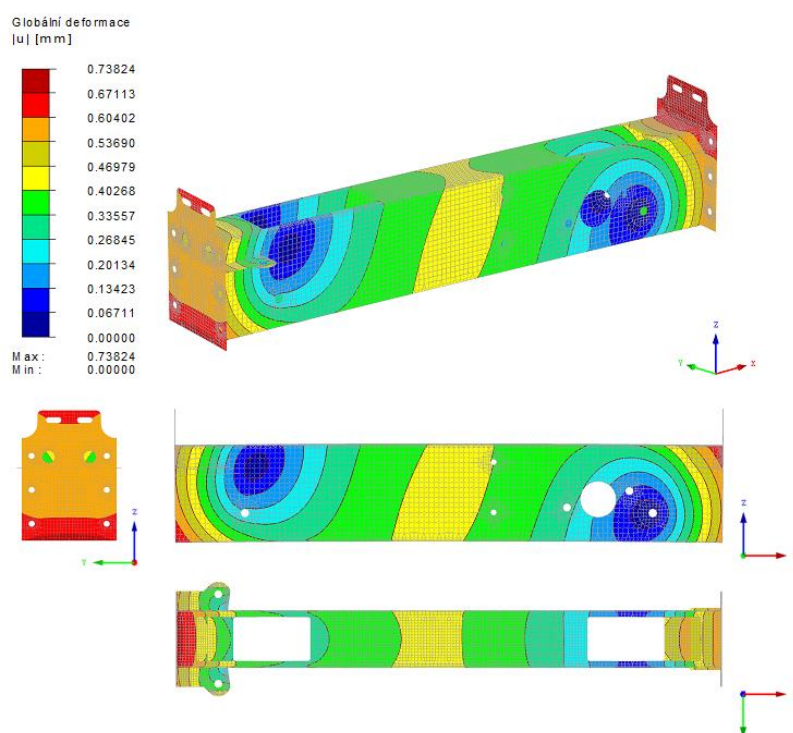
BILINEÁRNÍ MATERIÁLOVÝ MODEL



Obr. 30 Deformace nového podvozkového modulu s charakteristickým zatížením pro bilineární materiálový model

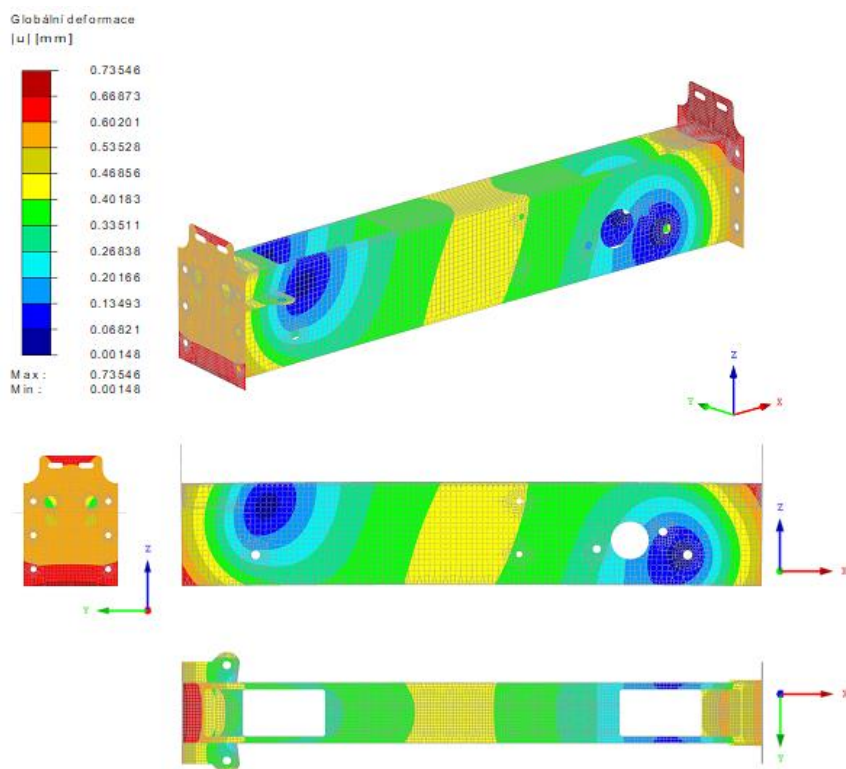
5.7.6 DEFORMACE – NOVÝ MODEL 30 TUN – CHARAKTERISTICKÉ ZATÍŽENÍ

LINEÁRNÍ MATERIÁLOVÝ MODEL



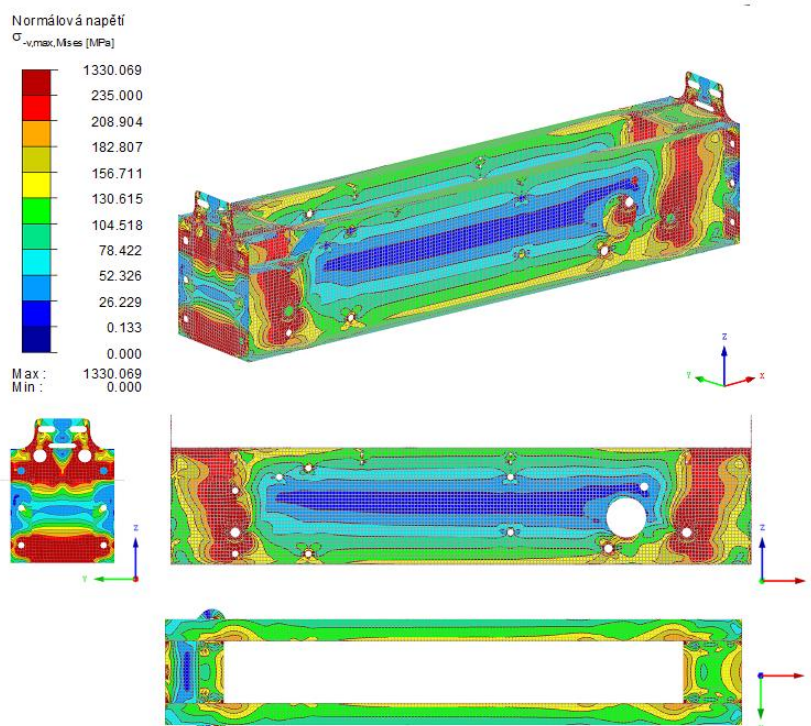
Obr. 31 Deformace nového podvozkového modulu s charakteristickým zatížením pro lineární materiálový model

BILINEÁRNÍ MATERIÁLOVÝ MODEL



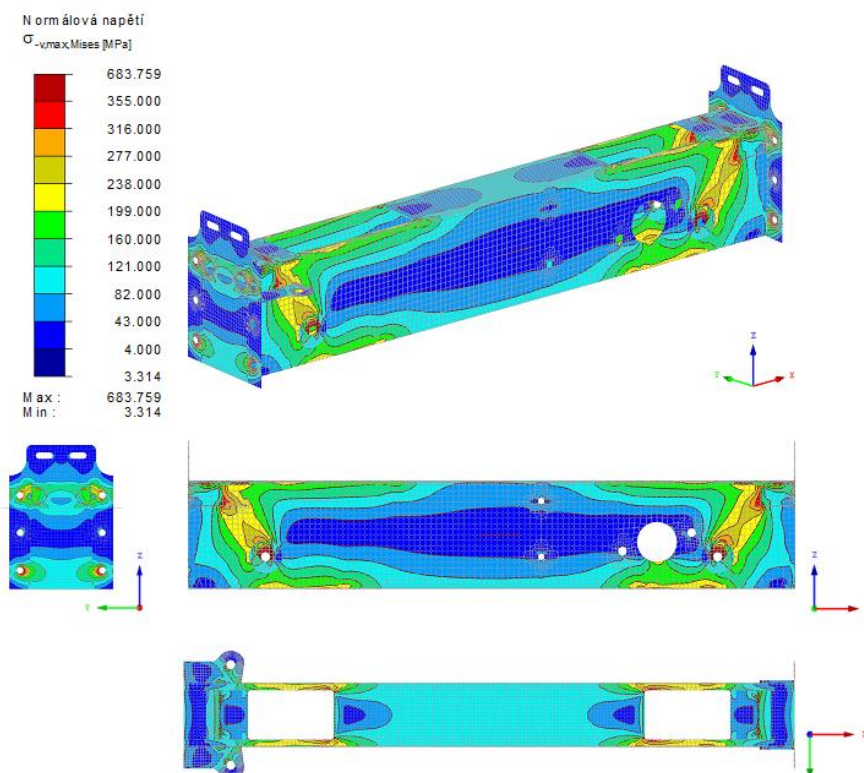
Obr. 32 Deformace nového podvozkového modulu s charakteristickým zatížením pro bilineární materiálový model

5.7.7 NAPĚTÍ VON MISES – PŮVODNÍ MODEL 24 TUN – NÁVRHOVÉ ZATÍŽENÍ PRO LINEÁRNÍ MATERIÁLOVÝ MODEL



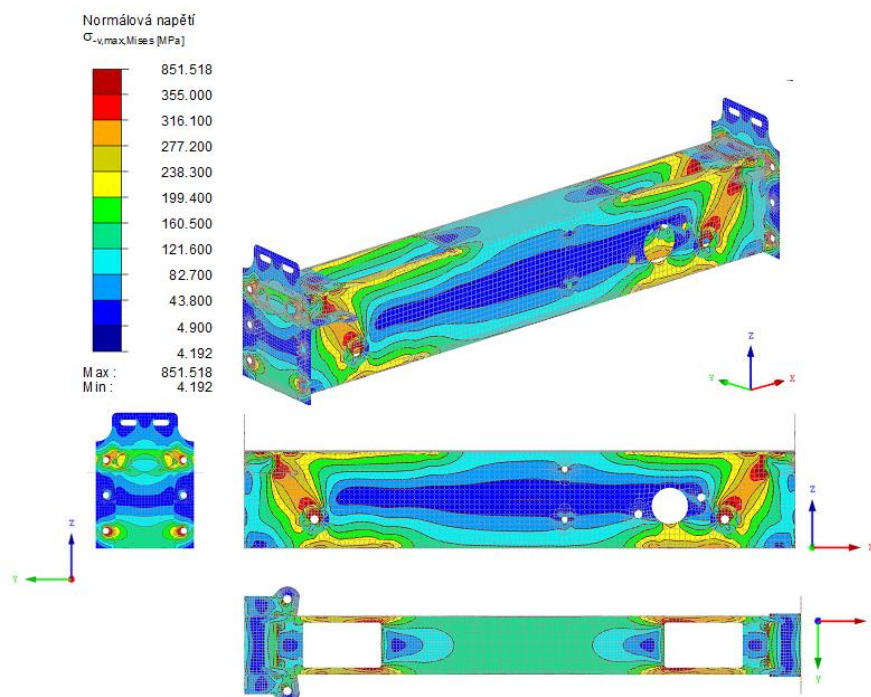
Obr. 33 Napětí von Mises původního podvozkového modulu s návrhovým zatížením pro lineární materiálový model

5.7.8 NAPĚTÍ VON MISES – NOVÝ MODEL 24 TUN – NÁVRHOVÉ ZATÍŽENÍ PRO LINEÁRNÍ MATERIÁLOVÝ MODEL



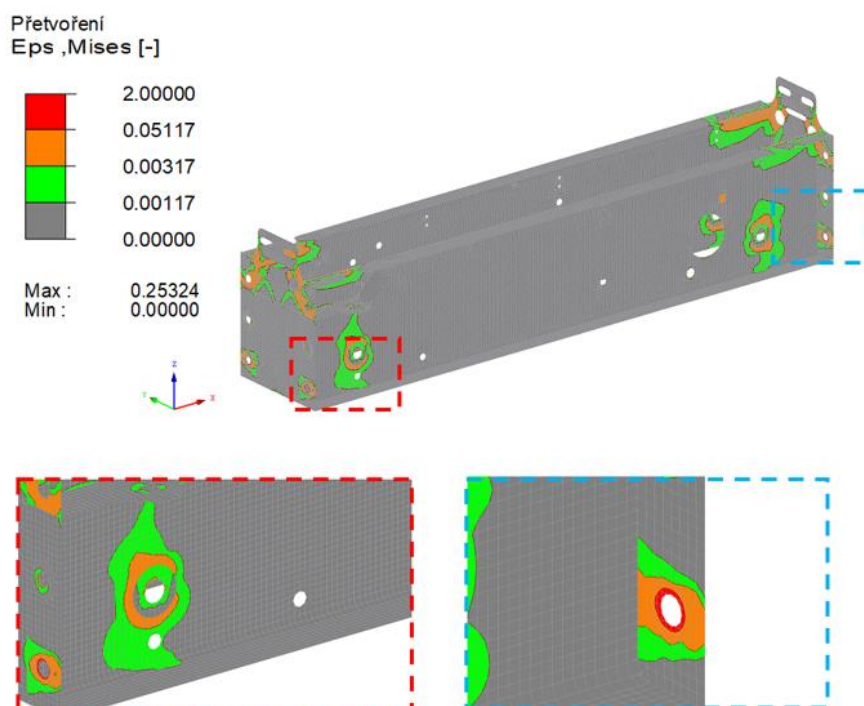
Obr. 34 Napětí von Mises nového podvozkového modulu s návrhovým zatížením pro lineární materiálový model

5.7.9 NAPĚTÍ VON MISES – NOVÝ MODEL 30 TUN – NÁVRHOVÉ ZATÍŽENÍ PRO LINEÁRNÍ MATERIÁLOVÝ MODEL



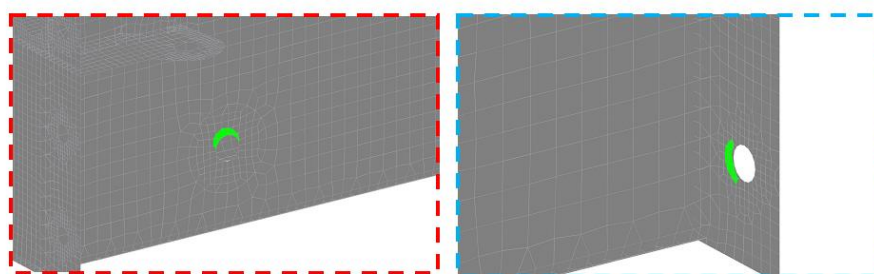
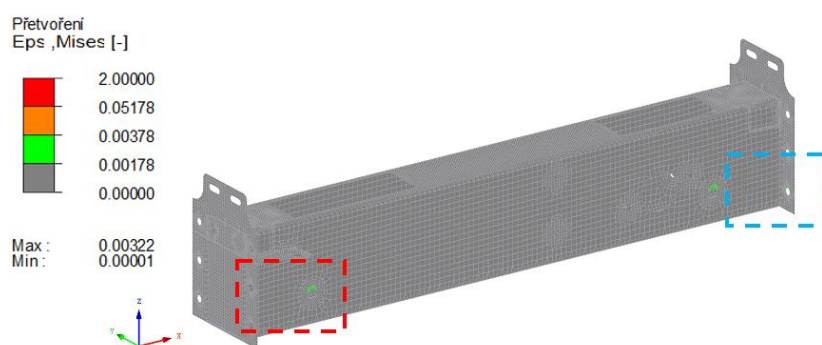
Obr. 35 Napětí von Mises nového podvozkového modulu s návrhovým zatížením pro lineární materiálový model

5.7.10 POMĚRNÉ PŘETVOŘENÍ – PŮVODNÍ MODEL 24 TUN – NÁVRHOVÉ ZATÍŽENÍ PRO BILINEÁRNÍ MATERIÁLOVÝ MODEL



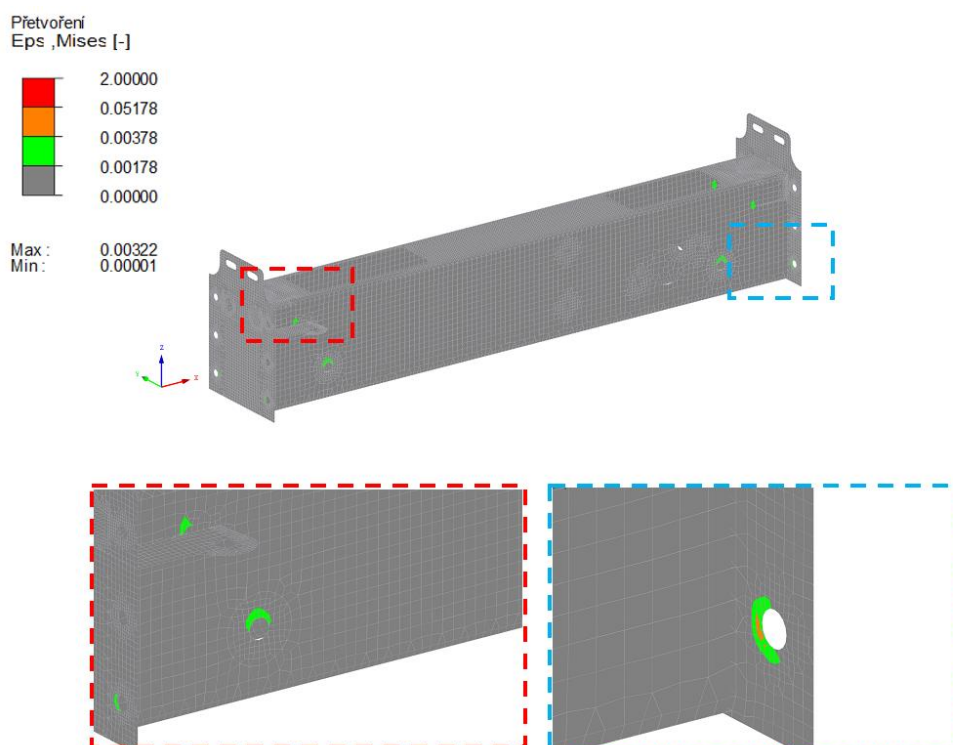
Obr. 36 Poměrné přetvoření původního podvozkového modelu s návrhovým zatížením pro bilineární materiálový model

5.7.11 POMĚRNÉ PŘETVOŘENÍ – NOVÝ MODEL 24 TUN – NÁVRHOVÉ ZATÍŽENÍ PRO BILINEÁRNÍ MATERIÁLOVÝ MODEL



Obr. 37 Poměrné přetvoření nového podvozkového modelu s návrhovým zatížením pro bilineární materiálový model

5.7.12 POMĚRNÉ PŘETVOŘENÍ – NOVÝ MODEL 30 TUN – NÁVRHOVÉ ZATÍŽENÍ



Obr. 38 Poměrné přetvoření nového podvozkového modelu s návrhovým zatížením pro bilineární materiálový model

5.7.13 VYHODNOCENÍ

V první části výstupů z programu RFEM jsou zobrazeny podporové reakce, které slouží uživateli především k ověření správnosti vstupních zatížení a redistribuci zatížení v řešené konstrukci. Z výstupů je patrné, že v numerických modelech je zadána vstupní síla 24 tun nebo 30 tun v charakteristických hodnotách. Reakce pro návrhové hodnoty jsou ovlivněny pouze součinitelem, který je definován dle typu řešeného zatížení.

V další části lze vidět výstupy v podobě deformací na skořepinových modelech podvozku. Z výsledků deformací je patrné, že nově navržený podvozek je tužší a jeho deformace jsou nižší. Maximální deformace u stávajícího podvozku byla spočtena na 0,879 mm a u nového podvozku na 0,592 mm. Tyto deformace jsou v obou případech spočteny na zatížení 24 tun z důvodu porovnání obou variant. Nový podvozek pro zatížení na 30 tun má maximální globální deformaci 0,783 mm a lze konstatovat, že je i pro své vyšší zatížení tužší a má menší deformace než podvozek původní počítaný na 24 tun.

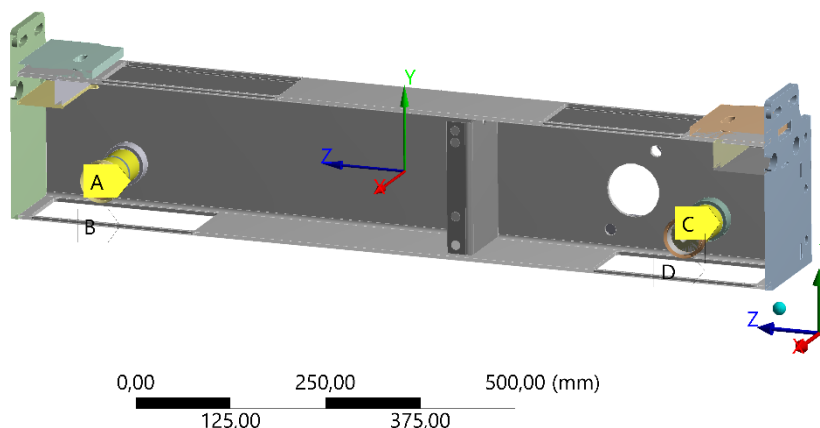
Z pohledu napětí a přetvoření lze obecně konstatovat, že původní podvozek vykazuje pro návrhové hodnoty značné překročení meze kluzu materiálu, který je v původním podvozku uvažován jako S235. K překročení meze kluzu dochází zejména v místě uložení kol a ve šroubových otvorech přípojného plechu. U nově navrhovaného podvozku jsou tato kritická místa vyztužena a také je uvažováno s lepším materiálem S355 o větší tloušťce. U nově navrhovaného podvozku jsou jasně viditelná zlepšení v kritických místech v porovnání s původním podvozkem. Z pohledu poměrného přetvoření dochází u stávající varianty k plastizaci v místě uložení hřídelí, ale tento detail uložení je modelován pouze schematicky a neodpovídá reálné geometrii uložení. Návrh řešení tohoto uložení hřídelí není součástí této bakalářské práce. V modelu nově navrženého podvozku je mezní přetvoření pod hodnotou 5 %. Tato mezní hodnota odpovídá požadavků na návrh plošných ocelových konstrukcí uvedených v normě ČSN EN 1993-1-5 článek C.8 *Kritéria mezních stavů*. Samotná konstrukce nově navrženého podvozku je vyhovující také pro požadované zvýšené zatížení 30 tun.

5.8 VERIFIKAČNÍ NUMERICKÝ MODEL NAVRHOVANÉHO ŘEŠENÍ POJÍZDNÉHO REGÁLU V SYSTÉMU ANSYS

5.8.1 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Okrajové podmínky odpovídají modelu vytvořeném v software RFEM v místech uložení kol, tedy na hřídelích (viz kapitola 5.3). Pro potřeby verifikační studie je model zaměřen detailně na část podvozku. Konstrukce regálu není modelována tak jako v případě numerického modelu v RFEM. Hodnoty zatížení jsou převzaty z výpočetního modelu RFEM.

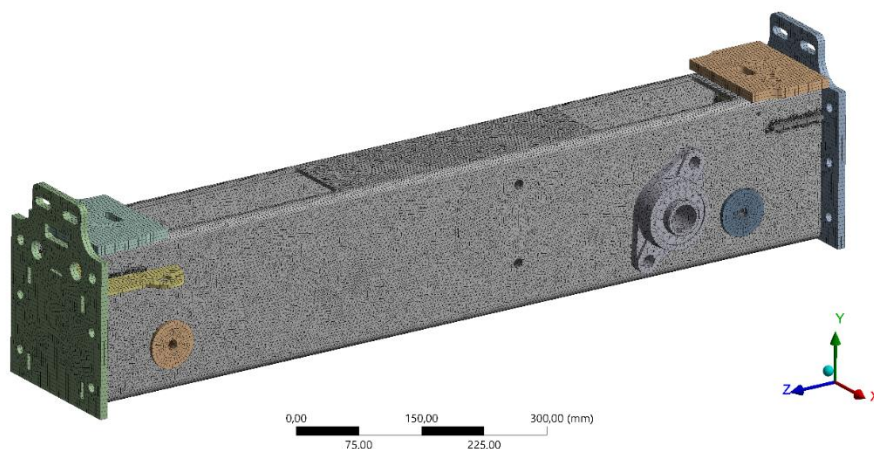
- A** Displacement
- B** Displacement 2
- C** Displacement 3
- D** Displacement 4



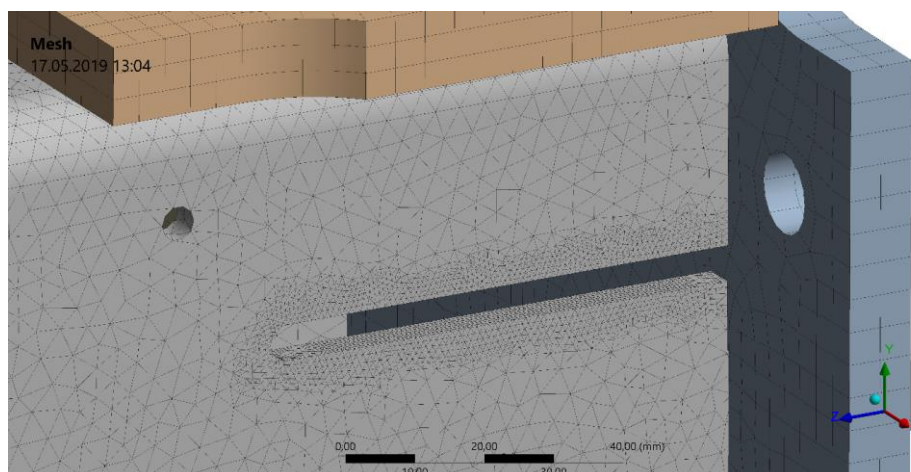
Obr. 39 Zadané okrajové podmínky v ANSYS

5.8.2 SÍŤ KONEČNÝCH PRVKŮ

Podvozkový modul byl globálně zasítován kvadratickými konečnými prvky SOLID186 a SOLID 187. V případě prvku SOLID 186 se jedná o dvacet uzlový konečný a v případě prvku SOLID 187 se jedná o deseti uzlový konečný prvek. Velikost sítě je nastavena na 5 mm. V okolí vrubů a otvorů byla síť lokálně zjemněna až na velikost 1 mm.



Obr. 40 Globální pohled na zasítovaný podvozkový modul

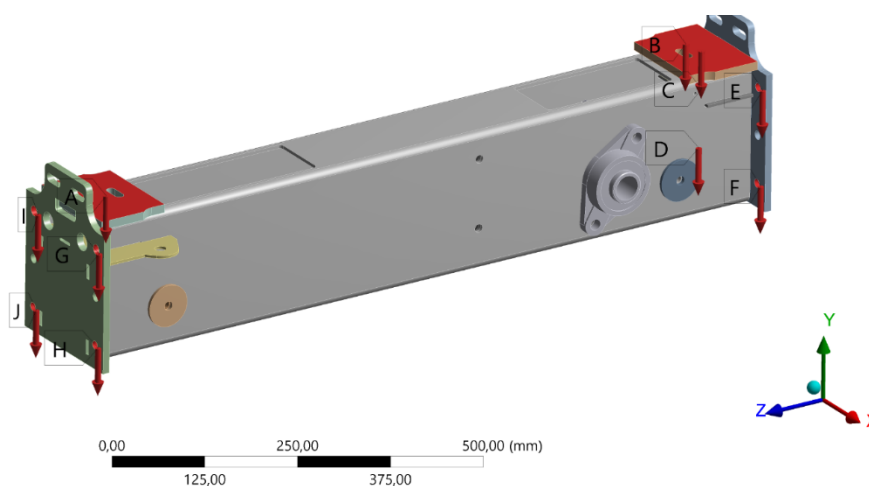


Obr. 41 Detail zjemnění sítě okolo otvorů

5.8.3 ZADANÁ VNĚJŠÍ ZATÍŽENÍ

V programu ANSYS nebyla modelována konstrukce regálu, ale síly byly zadány parametrem FORCE přímo na dané komponenty podvozku. Procentuálně je zatížení rozloženo stejně, tedy 80 % z 30 tun působí na úložné plochy podvozku a 20 % na čela podvozkového modulu v místě šroubů. Zatížení bylo zadáno se součinitelem zatížení, který je v dle normy ČSN EN 1995-1 roven 1,4. Zobrazené hodnoty zatížení jsou tedy návrhové. Okrajové podmínky jsou znázorněny na obr. 42.

- A** Force: 1,68e+005 N
- B** Force 2: 1,68e+005 N
- C** Force 3: 10500 N
- D** Force 4: 10500 N
- E** Force 5: 10500 N
- F** Force 6: 10500 N
- G** Force 7: 10500 N
- H** Force 8: 10500 N
- I** Force 9: 10500 N
- J** Force 10: 10500 N



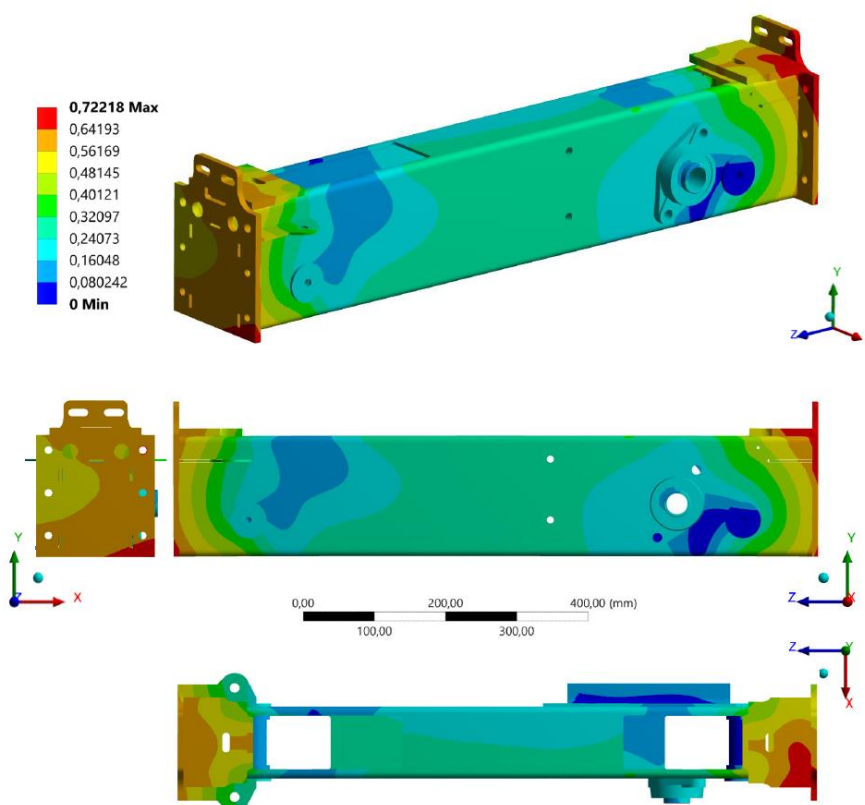
Obr. 42 Zadané okrajové podmínky v programu ANSYS

5.8.4 PARAMETRY VÝPOČTU

Numerický model v ANSYS je koncipovaný jako konstrukčně a geometricky nelineární. Konstrukční nelinearita je představována využitím kontaktů. Taková vazba přenáší pouze tlak, ale nepřenáší tah. V kontaktech je také zohledněno tření mezi styčnými plochami. V úloze podvozku jsou třecí kontakty definovány v místě uložení ložisek a otvorem podvozku, dále mezi roznášecí plochou pro sloup a profilem podvozku. Geometrická nelinearita je zohledněna výpočtem podle teorie II. řádu. Metoda výpočtu je zvolena Newton – Raphsonova iterační metoda. Jedná se o přírůstkovou metodu řešení soustavy rovnic, jejíž postup spočívá v opakovaných opravách přibližného řešení založeného na linearizaci tzv. tečné tuhosti. Tečná tuhost je směrnice tečny zatěžovací charakteristiky. Na malém úseku zatěžování (malá změna zatížení ΔF a malá změna deformace Δx) ji lze interpretovat jako tuhost lineární soustavy. Ve větším rozsahu zatěžování se však tuhost mění. Výpočet konverguje po dosažení předepsaných kritérií přesnosti. [16]

5.8.5 VÝSLEDKY

DEFORMACE



Obr. 43 Deformace nového podvozkového modulu

NAPĚTÍ VON MISES

F: Copy of 2nd_model_

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

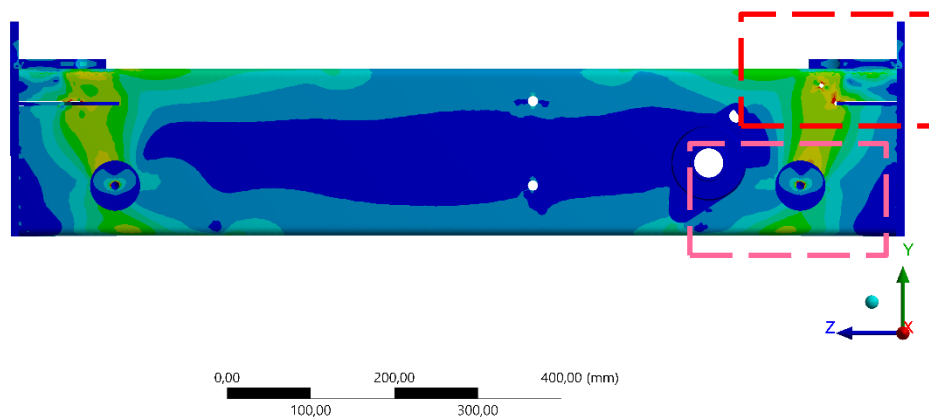
Unit: MPa

Time: 1

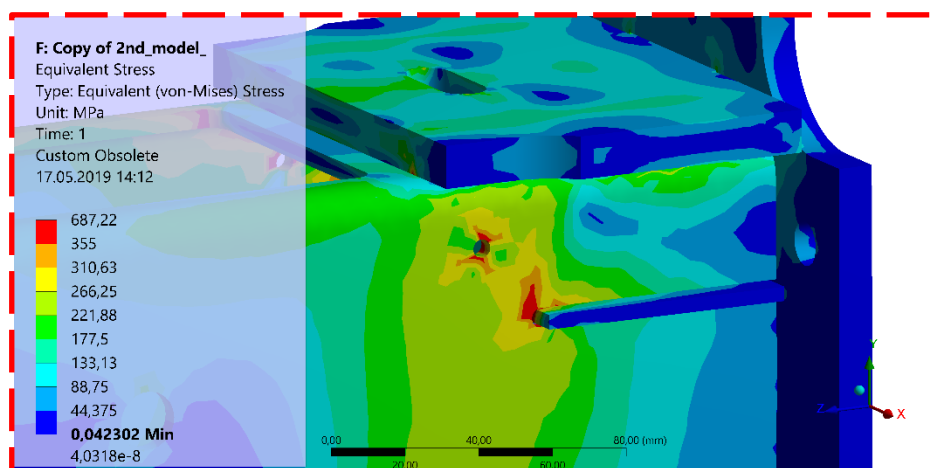
Custom Obsolete

17.05.2019 14:09

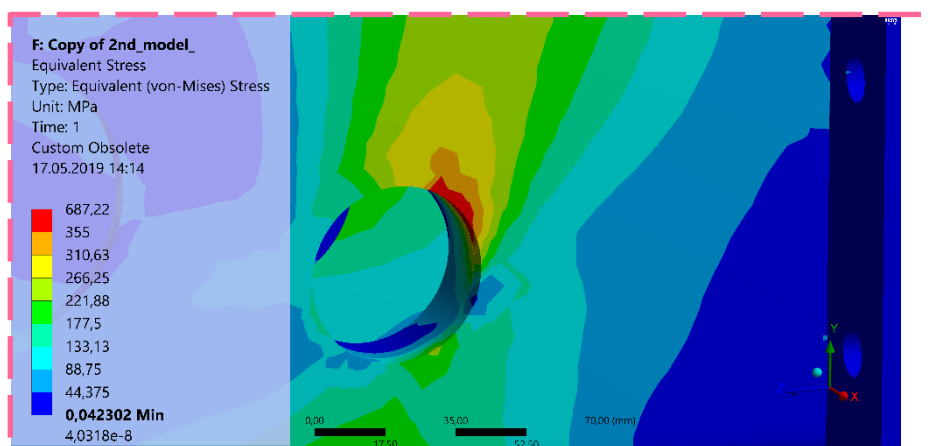
687,22
355
310,63
266,25
221,88
177,5
133,13
88,75
44,375
0,042302 Min
4,0318e-8



Obr. 44 Globální pohled navrženého podvozkového modulu – napětí von Mises



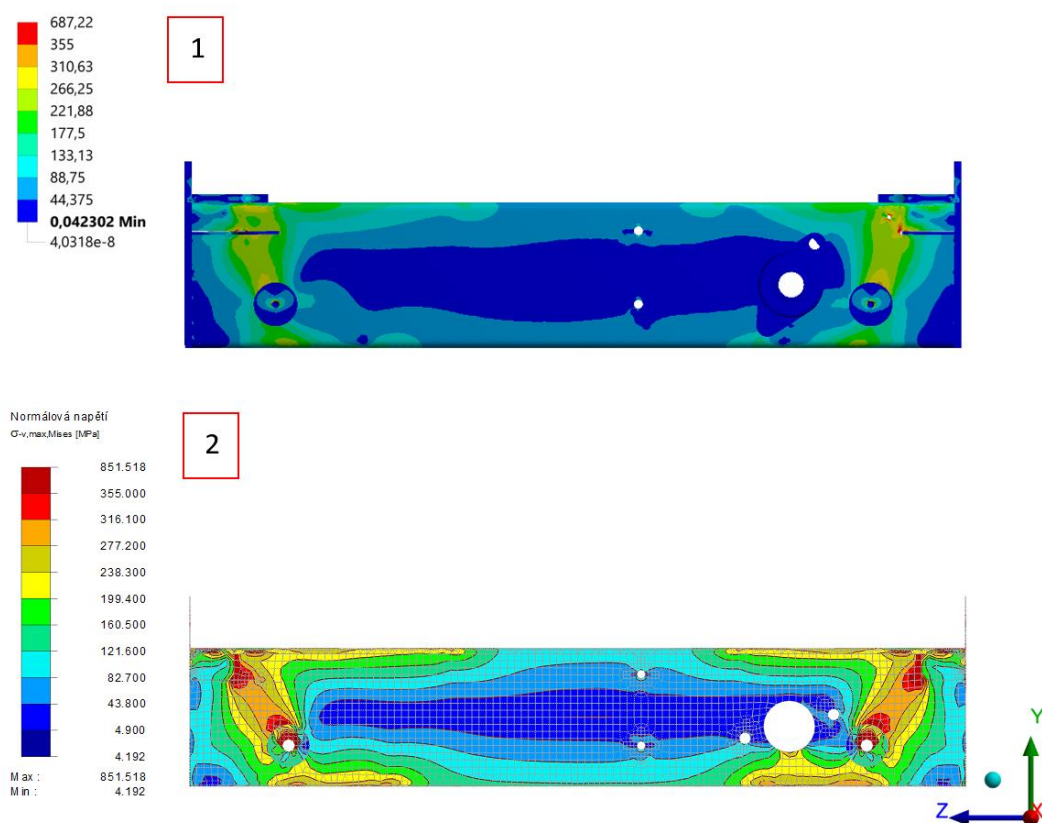
Obr. 45 Detail 1 - koncentrace napětí von Mises



Obr. 46 Detail 2 – koncentrace napětí von Mises

5.8.6 POROVNÁNÍ ŘEŠENÍ RFEM VS. ANSYS

Numerické modely, které byly vytvořeny v programu RFEM, poskytly globální pohled na chování konstrukce jako celku a byla modelována vzorová sestava pojízdného regálu. Detailně byl pak v programu RFEM modelován samotný podvozek, který byl vytvořen kombinací skořepinových a objemových prvků. Numerické modely v RFEM poskytly dostačující informace o exponovaných místech řešení konstrukce a možnosti pro jejich optimalizaci. V rámci verifikace a ověření výsledků, byl vytvořen samostatný model podvozku v programu ANSYS, který byl tvořen čistě objemovými prvky. Jednalo se o sofistikovanější numerický model, kde byly detailněji modelovány všechny hlavní nosné části. Model v ANSYS je konstrukčně a geometricky nelineární model. Jsou uvažovány kontaktní spojení, vazby mezi jednotlivými částmi jsou modelovány pomocí vazeb (joints). Nicméně zde nebyly modelovány konstrukce regálu, které byly nahrazeny vnějšími vazbami. Výsledkem porovnání těchto modelů je konstatování, že jsou z pohledu deformací a napětí (zejména rozložení) ve velké shodě.



Obr. 46 Srovnání napětí von Mises: 1 – Data získané ze softwaru ANSYS;
2 – Data získané ze softwaru RFEM

ZÁVĚR

V první kapitole této práce je uvedena důležitost logistiky skladování. Skladovací systémy a možnosti skladování lze dělit dle různých aspektů, které jsou popsány druhé kapitole. V rámci této práce byly podrobněji popsány vybrané typy paletových skladovacích systémů. Díky možnosti uskladnění materiálu různých rozměrů a rychlejší manipulaci materiálu na paletách vysokozdvížnými vozíky, patří paletový skladovací systém v současné době k nejrozšířenějšímu typu uskladnění materiálu. Podrobně se bylo věnováno pojízdnému skladovému systému, jehož součástí je i podvozkový modul a jeho optimalizace. Byl zde detailně popsán konstrukční a technologický postup výroby stávajícího podvozkového modulu, který byl porovnán s nově navrženým podvozkovým modulem.

Stěžejní část této práce se zabývala numerickým modelováním, a to především v software RFEM. Oba podvozkové moduly byly detailně namodelovány pomocí skořepinových a objemových prvků. Nosná konstrukce regálu byla vytvořena pomocí prutových prvků. Pro porovnání stávajícího a nově navrženého podvozkového modulu byly zvoleny dva zatěžovací stavy s maximální možným zatížením 24 tun od palet. Ze získaných dat je patrný nárůst tuhosti u nové koncepce podvozkového modulu. Nově navržený typ podvozku byl zatížen také maximálním zatížením 30 tun od palet. Z výsledků porovnání je patrné, že nový typ podvozku je únosnější než podvozek stávající.

V poslední části byl proveden verificační model nově navrženého podvozkového modulu v software ANSYS. Jedná se o sofistikovanější numerický model, kde byly detailněji modelovány všechny hlavní nosné části podvozkového modulu. Výsledky z programu RFEM a ANSYS jsou velmi dobré shodě, což jen potvrzuje správnost modelování obou konstrukcí.

Na závěr lze konstatovat, že nově navržený konstrukční model konceptu podvozkového modulu splnil očekávání. Vzhledem ke stávající variantě vedl ke zvýšení tuhosti a je schopen přenést větší zatížení než stávající varianta. Dále nabízí potenciál k zeštíhlení výrobních procesů. Momentálně odpadla výrobní operace ohýbání plechů. V budoucnu lze uvažovat také s odstraněním obrábění kolem hřidel, které je u stávajícího řešení nutné. Obrábění by bylo nahrazeno operací na trubkovém laseru. Tato bakalářská práce je základním podkladem pro další vývoj nové generace pojízdných podvozků s využitím možnosti použití bezešvého válcovaného dutého profilu pro podvozkový modul.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] SCHULTE, Christof. *Logistika*. Praha: Victoria Publishing, 1994. ISBN 80-856-0587-2.
- [2] DRAHOTSKÝ, Ivo a Bohumil ŘEZNÍČEK. *Logistika - procesy a jejich řízení*. Brno: Computer Press, 2003. Praxe manažera (Computer Press). ISBN 80-722-6521-0.
- [3] LAMBERT, Douglas a Lisa ELLRAM. *Logistika: příkladové studie, řízení zásob, přeprava a skladování, balení zboží*. Vyd. 1. Praha: Computer Press, 2000. Business books (Computer Press). ISBN 80-7226-221-1.
- [4] Just-in-time manufacturing. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. b.r. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Just-in-time_manufacturing
- [5] GROS, Ivan. Velká kniha logistiky. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2016. ISBN 978-80-7080-952-5.
- [6] PERNICA, Petr. *Logistika pro 21. století: (supply chain management)*. Vyd. 1. Praha: Radix, 2005, s. 1096-1698. ISBN 80-860-3159-4. Sd
- [7] METODA FIFO. *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. b.r. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_FIFO
- [8] METODA LIFO. *Management mania* [online]. b.r. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/last-in-first-out>
- [9] *JéHáčko* [online]. TYPOS, tiskařské závody, s.r.o., 2016, (12) [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: https://www.jungheinrich.cz/fileadmin/lang_content/cz/company/akcni_nabidky/pdf/mini_jehacko_12-16.pdf
- [10] ČSN EN 15620. *Ocelové statické skladovací systémy - představitelné paletové regály - Tolerance, deformace, vůle*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 68 s.
- [11] *JUNGHEINRICH: regálové systémy* [online]. b.r. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.jungheinrich.cz/cs/cz/jungheinrich/produkty/jungheinrich-system/regaly/>
- [12] SSI SCHÄFER: SSI SCHÄFER v České republice [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://www.ssi-schaefer.com/cs-cz>
- [13] KREDIT: Prospekty skladovací techniky, skladových regálů a profilový katalog. In: : Mobipal - katalog [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.kredit.cz/ke-stazeni/>
- [14] DLUBAL SOFTWARE: RFEM - statická analýza pomocí modelů MKP [online]. [cit. 2019-05-2]. Dostupné z: <https://www.dlubal.com/cs/produkty/rfem/zakladni-informace>
- [15] ČSN EN 15512: 2009. *Ocelové statické skladovací systémy - Přestavitelné paletové regálové systémy - Zásady navrhování konstrukce*.

- [16] Newton's method. *Wolfram Mathworld: Built with Mathematica Technology* [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://mathworld.wolfram.com/NewtonsMethod.html>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

FIFO	Metoda skladování zásob - první dovnitř, první ven (z anglického „ <i>First in, first out</i> “)
IPE	Ocelový typ nosníku (z anglického „ <i>I = I-section beam, P = parallel flanges, E = European (UNI 5398)</i> “)
JIT	Metoda přístupu výroby, založená na výrobě výrobků přímo dle požadavků zákazníka (z anglického „ <i>Just in time</i> “)
KZ	Kombinace zatížení
LIFO	Metoda skladování zásob – Poslední dovnitř, první ven (z anglického „ <i>Last in, first out</i> “)
MAG (135)	obloukové svařování tavící elektrodou (z anglického „ <i>Metal Activ Gas</i> “)
MKP	Metoda konečných prvků
VRS	Mobilní podvozkový systém (z německého „ <i>Verschieberegalanlagen</i> “)
ZS	Zatěžovací stav

F_1	[N]	Síla působící na čelo podvozku
F_2	[N]	Síla působící na vnitřní výztuhu podvozku
L_3	[mm]	Minimální velikost nosníku mezi dvěma paletami
q	[kN/m]	Liniové zatížení
n	[ks]	Počet palet
s	[mm]	Šířka europalety
x_1	[mm]	Minimální vzdálenost mezi sloupkem rámu a paletou
x_2	[mm]	Minimální vzdálenost mezi dvěma paletami

SEZNAM PŘÍLOH

Výkresová dokumentace

- | | | |
|--------------------|-----------------|-------------------------------------|
| • Výkres sestavy | A2- BP/MP-00.00 | Výkres sestavy podvozkového modulu |
| • Výkres svařence | A2- BP/MP-01.00 | Výkres svařence podvozkového modulu |
| • Výkresy součástí | A3- BP/MP-01.01 | Výkres bezešvého dutého profilu |
| | A3- BP/MP-01.02 | Výkres čela plechu |
| | A4- BP/MP-01.03 | Výkres úložného plechu |
| | A3- BP/MP-01.04 | Výkres horizontální výztuhy 1 |
| | A4- BP/MP-01.05 | Výkres horizontální výztuhy 2 |
| | A4- BP/MP-01.06 | Výkres vertikální výztuhy 1 |